L'effet de serre et les conséquences de ses variations

Jean-Louis Dufresne

Institut **P**ierre **S**imon **L**aplace
Laboratoire de **M**étéorologie **D**ynamique
CNRS/ENS/X/UPMC

VISIT…

LANZAROTE
Caliente.COM

Plan

1. Découverte et physique de l'effet de serre

2. Changements climatiques récents

3. Projections pour le futur

4. Conclusion

L'hypothèse de l'effet de serre

Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaire, J. Fourrier, 1824



Joseph Fourrier
(1768-1830)

- La température d'une planète est déterminée par son bilan d'énergie

- Les principaux modes de transferts d'énergie sont
  1. Rayonnement solaire
  2. Rayonnement infra-rouge
  3. Conduction avec le centre de la Terre

- Les échanges de chaleurs entre la surface et l'intérieur de la Terre sont négligeables en moyenne annuelle

- Analogie entre l'atmosphère et la « boite chaude » utilisé par H.B. de Saussure

- En hiver, la température des pôles est égale à la température de « l'espace planétaire »

- Toutes variations de l'ensoleillement ou des propriétés de surface modifieront la température de surface

[Dufresne, 2006]

Calcul de l'effet de serre

On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground, S. Arrhenius,1896.

- Calcul de l'effet de serre
- Cycle du carbone et variation du CO_2 atmosphérique
- Le CO_2 peut expliquer les variations climatiques passées et pourrait influencer le climat futur

Doublement de CO_2 => $\Delta T \approx 4$ à 5°C



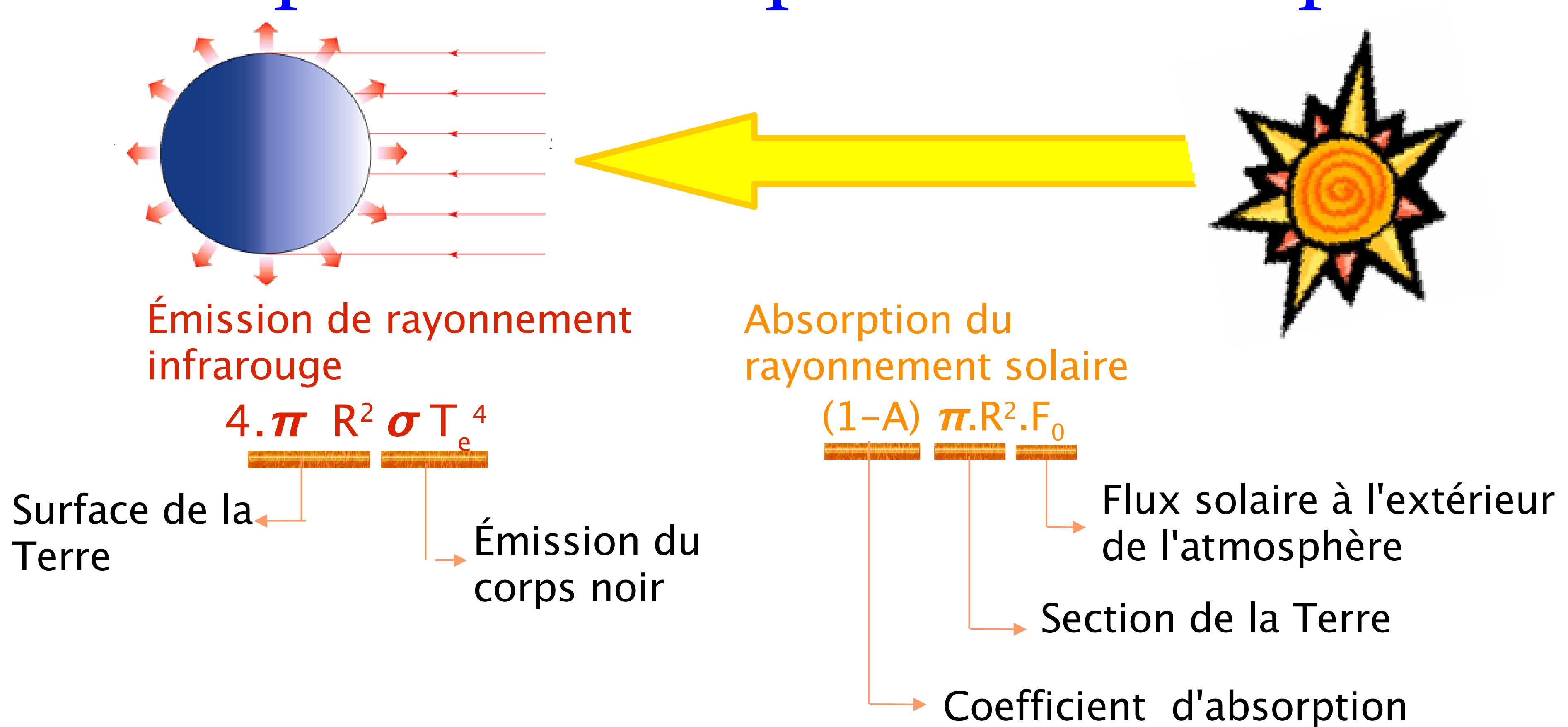
Svante Arrhenius
(1859-1927)

Svante Arrhenius:

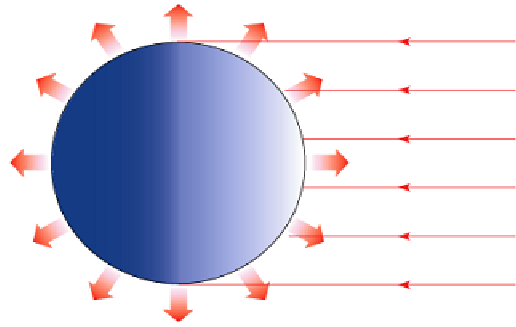
- Aborde le problème dans sa globalité
- Se base sur les travaux de Fourier, Pouillet, Tyndall et Langley
- Propose et utilise un modèle de l'effet de serre

Svante Arrhenius trouve un accroissement de température en réponse à une variation de CO_2 proche des estimations actuelles… mais grâce à plusieurs erreurs qui se compensent.

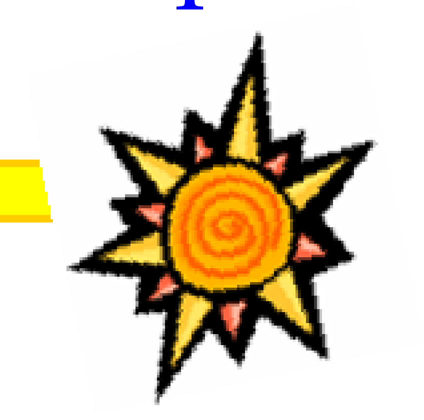
Température d'équilibre d'une planète



Température d'équilibre d'une planète







Émission de rayonnement infrarouge

$4.\pi \ R^2 \sigma T_e^4$ = $(1-A) \ \pi.R^2.F_0$

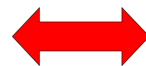
Absorption du rayonnement solaire

équilibre énergétique

$\sigma T_e^4 = \frac{1}{4} (1-A) F_0$ avec

- Te: Température d'équilibre radiatif
- A : albédo planétaire
- F_0: Flux solaire à l'ext. de l'atmosphère
- σ : constante de Stefan-Boltzmann

➡ Pertinence de la notion de **température surfacique moyenne** d'une planète

Pour la Terre: **Te = 255K**  **Ts = 288 K**

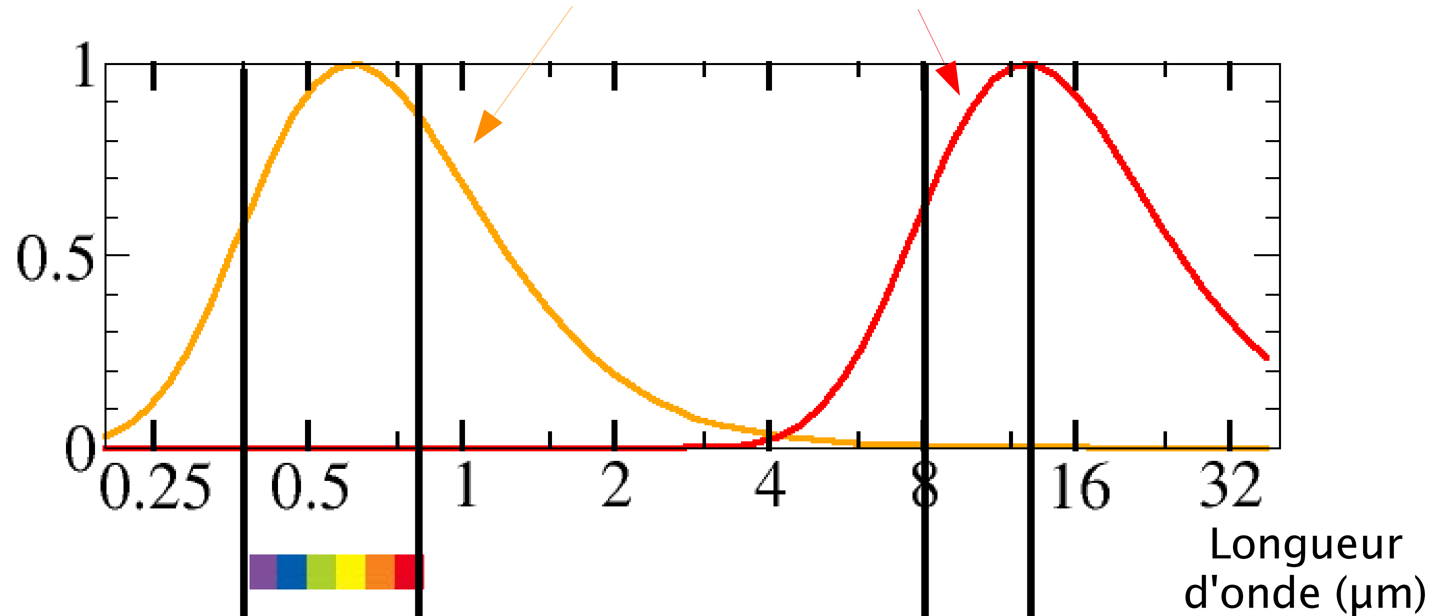
Effet de serre

Ts: temp. moyenne de surface

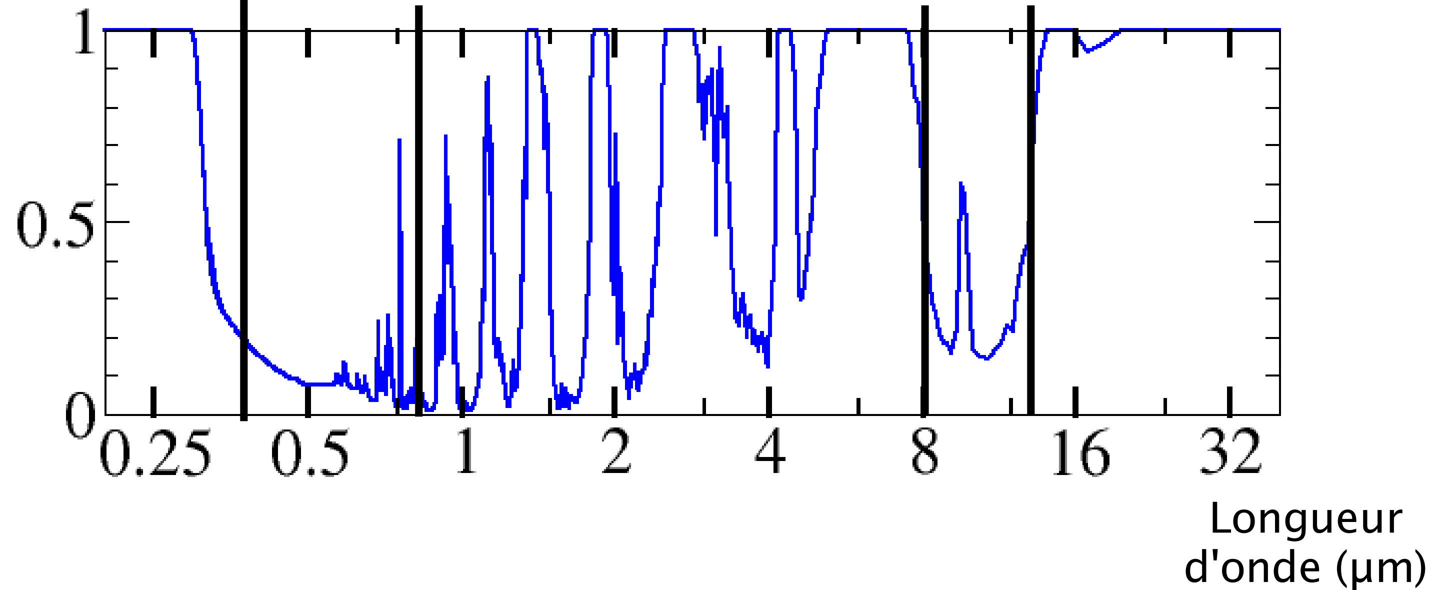
Flux solaire absorbé ≈ 0.175 F_0 ≈ 1/6 Flux solaire incident

Spectres d'émission et d'absorption

Émission par le soleil et la surface de la Terre

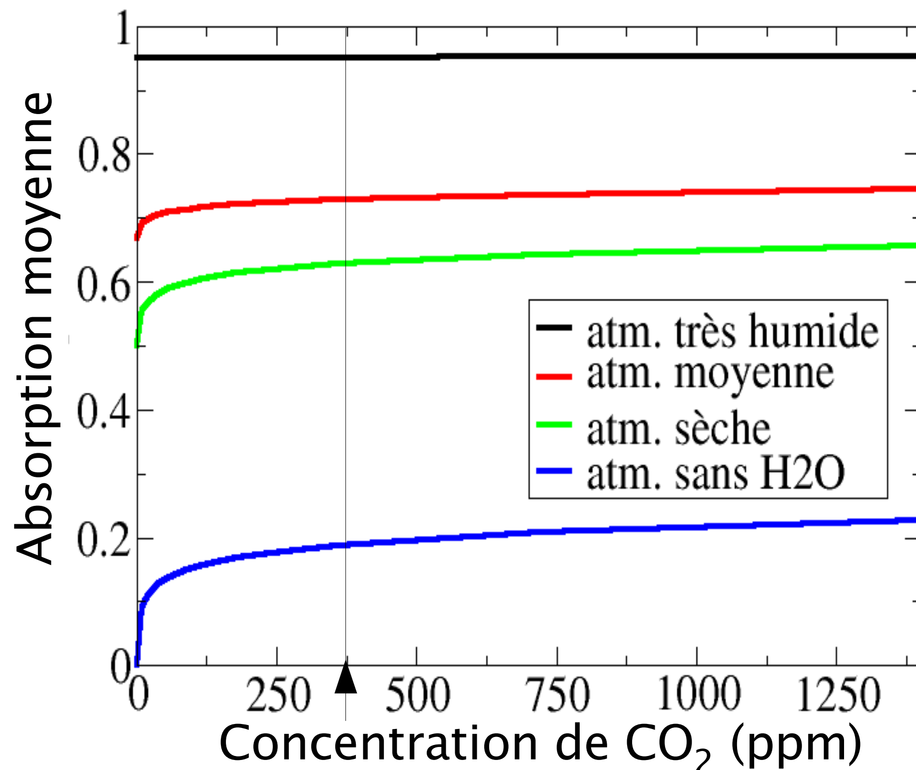


Absorption par l'atmosphère



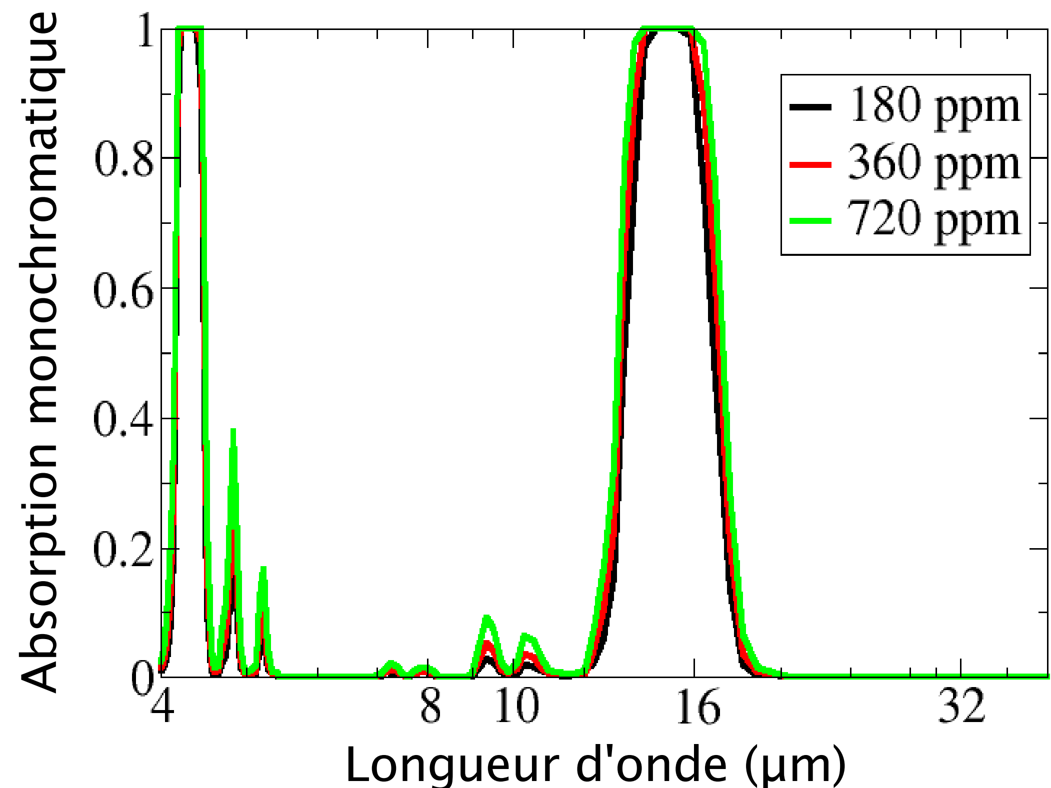
Effet de saturation

Absorption de l'atmosphère **moyennée** sur le domaine infra-rouge en fonction du CO_2, pour différentes valeurs de H_20



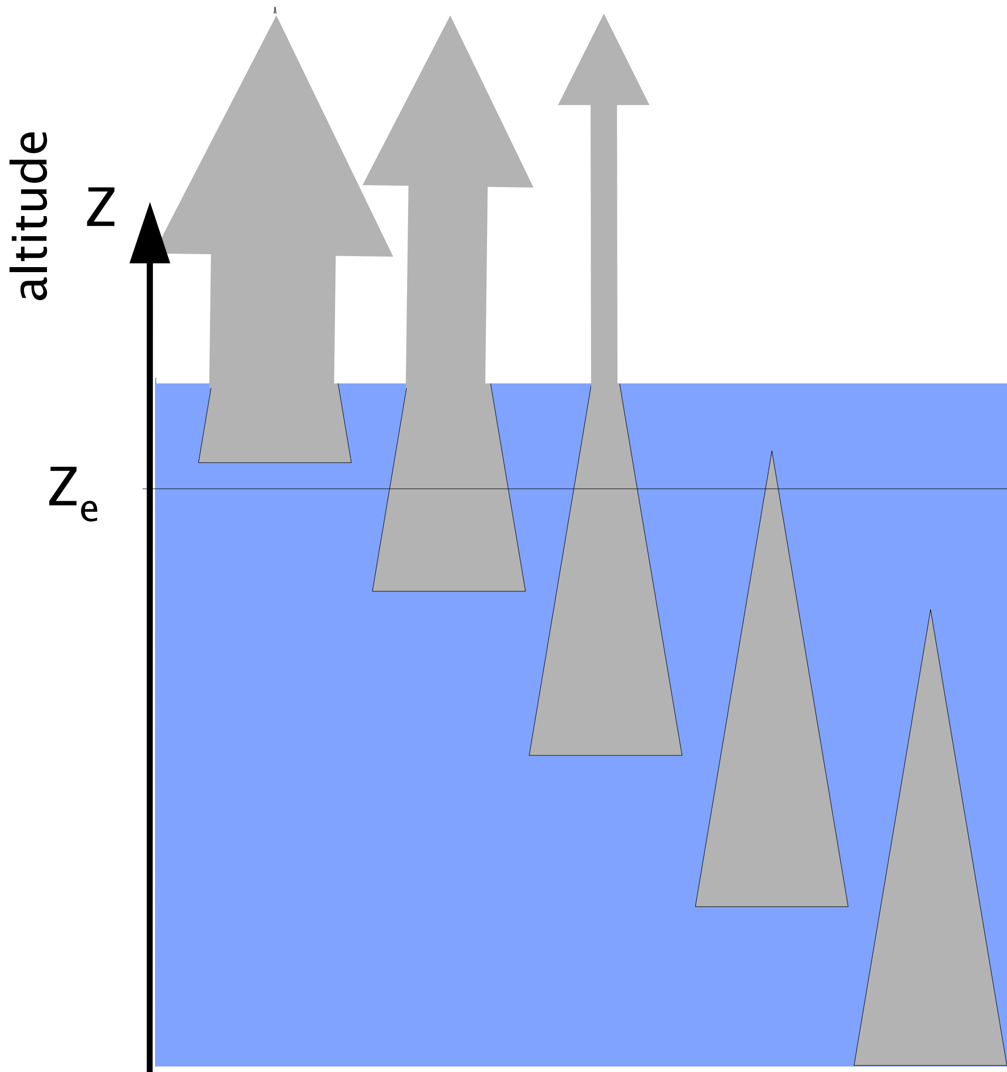
Concentration de CO_2 (ppm)

Absorption monochromatique de l'atmosphère due au seul CO_2, en fonction de la longueur d'onde, pour différente concentration de CO_2



Longueur d'onde (µm)

Altitude d'émission



Densité du flux radiatif échangé entre un volume de gaz à l'altitude z et l'espace:

$$\frac{\partial \Psi_{\nu}(z)}{\partial m} = \underbrace{\kappa_{\nu} B_{\nu}(T)}_{\text{flux émis}} \underbrace{exp(-\kappa_{\nu}.M(z))}_{\text{transmissivité}}$$

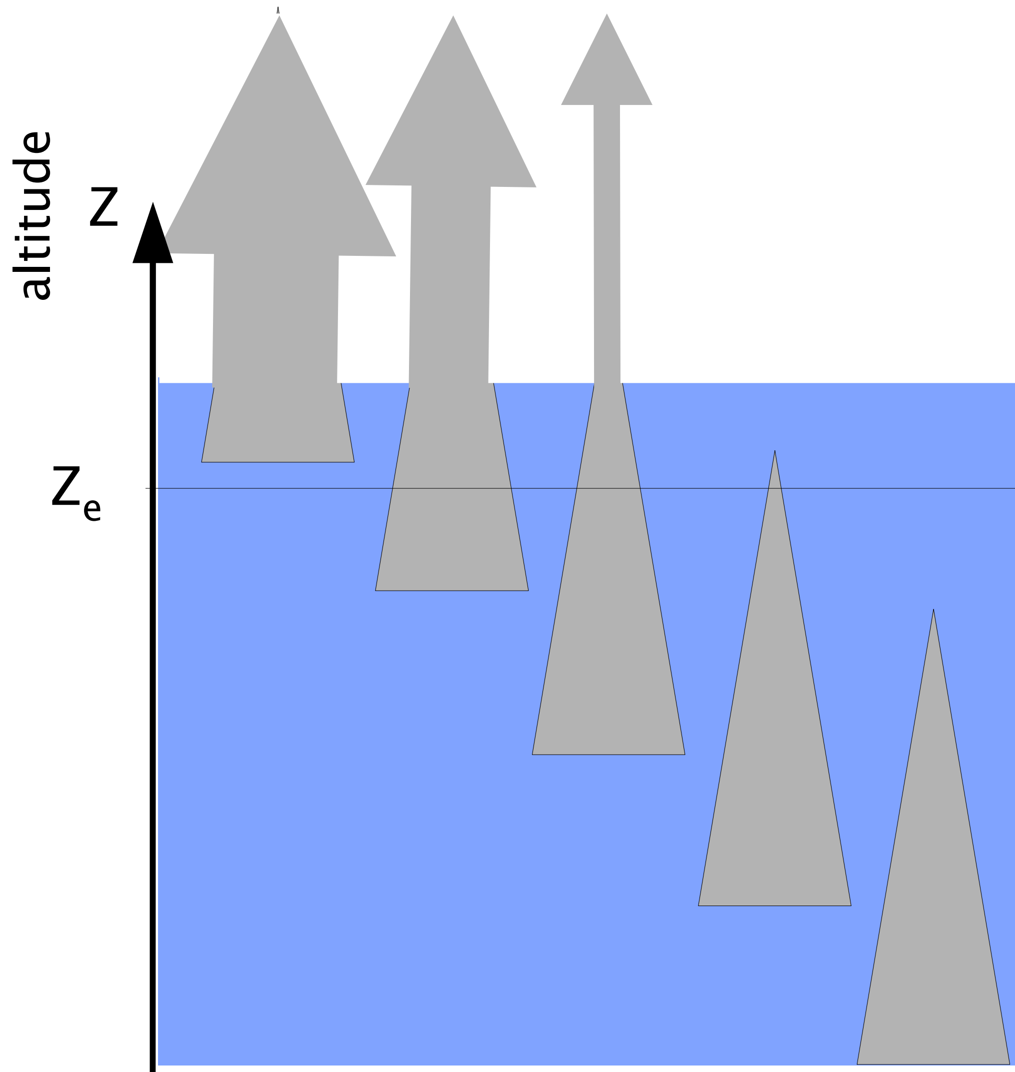
avec:

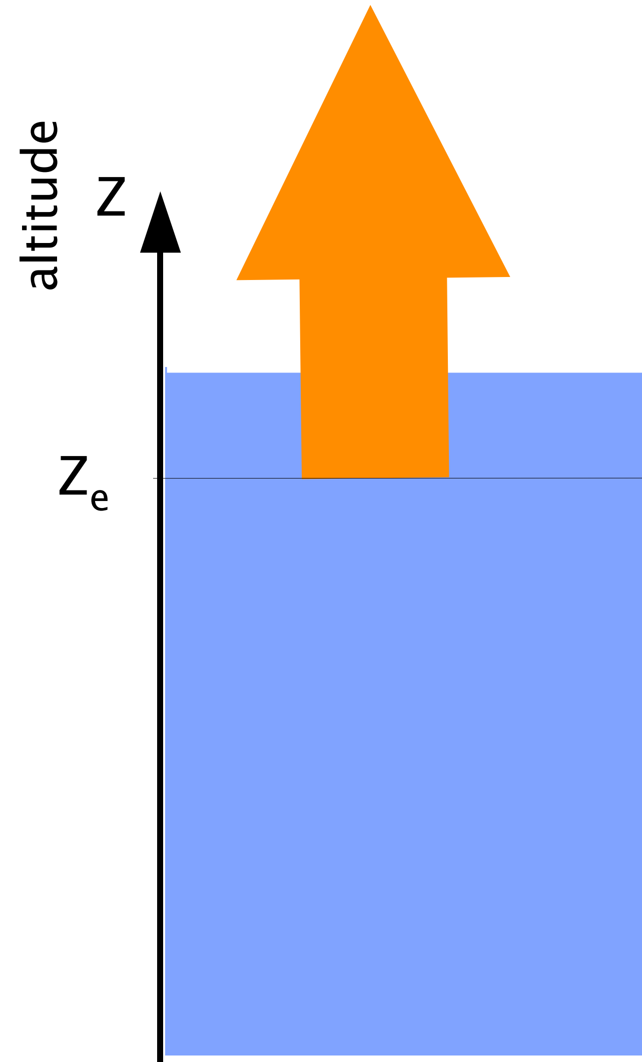
M(z): masse d'atmosphère entre z et l'espace

k_{ν}: coefficient d'absorption par unité de masse

$B_{\nu}(T)$: fonction de Planck

Altitude d'émission

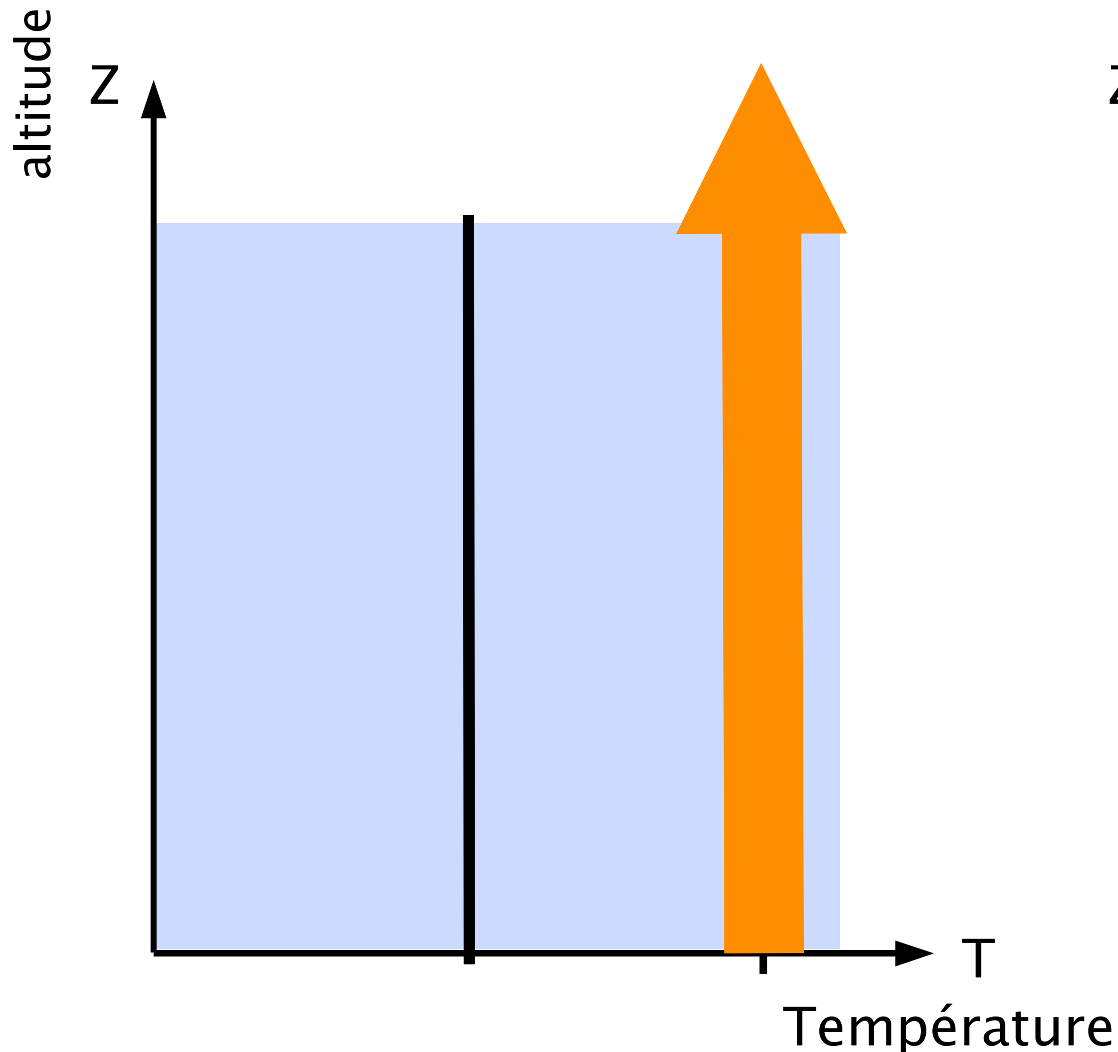


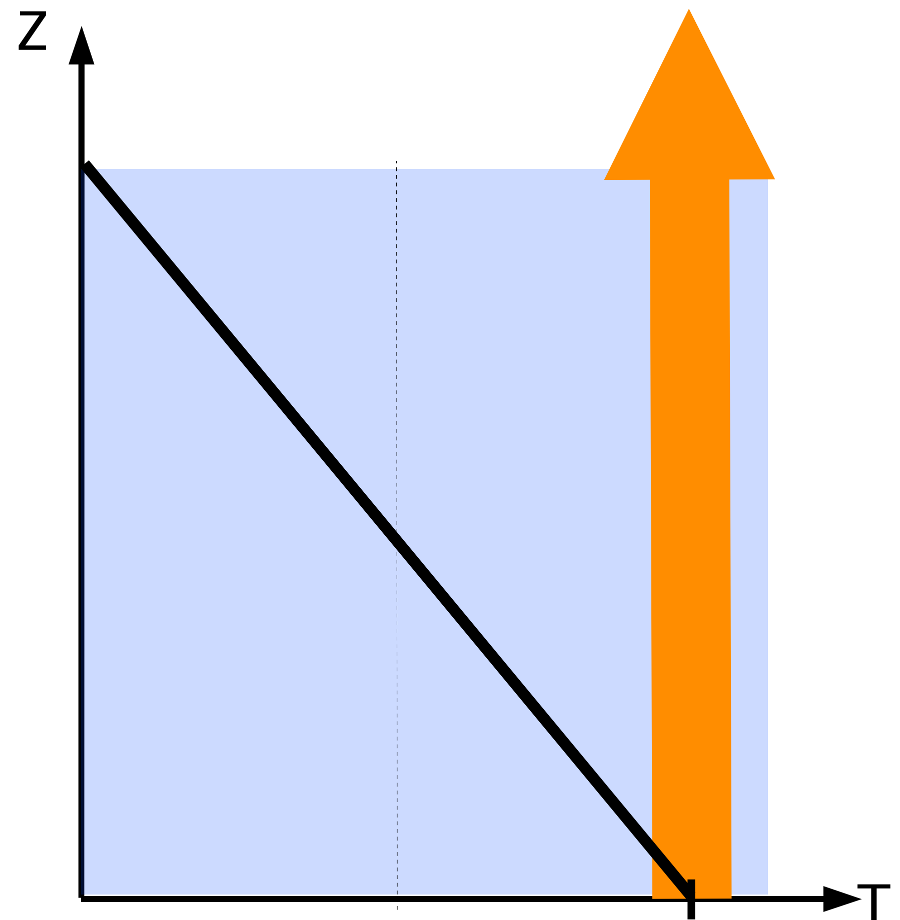


Effet de serre dans un milieu isotherme ou stratifié

Rayonnement IR sortant : $\epsilon.\sigma.T(z_e)^4$

Ze: altitude d'émission vers l'espace

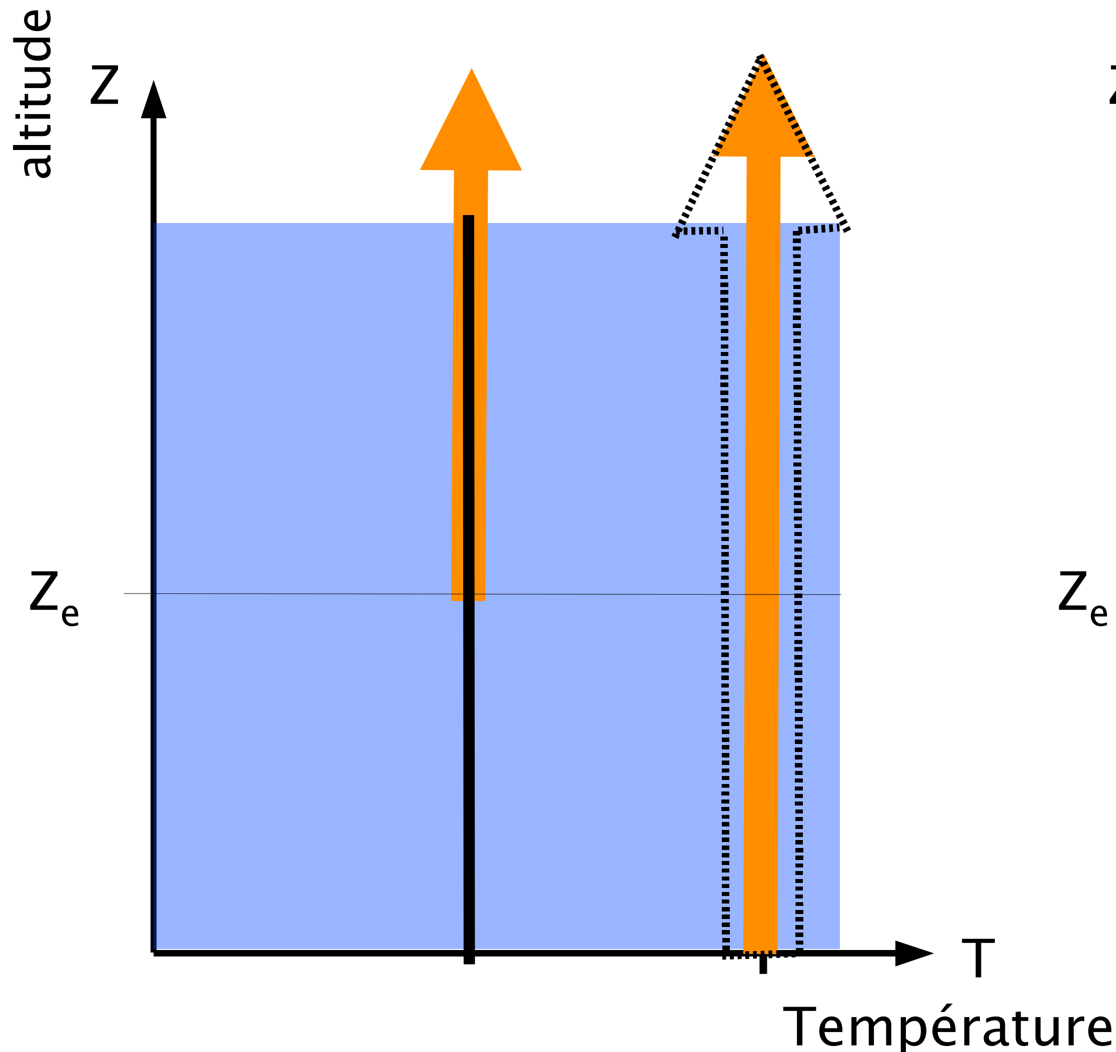


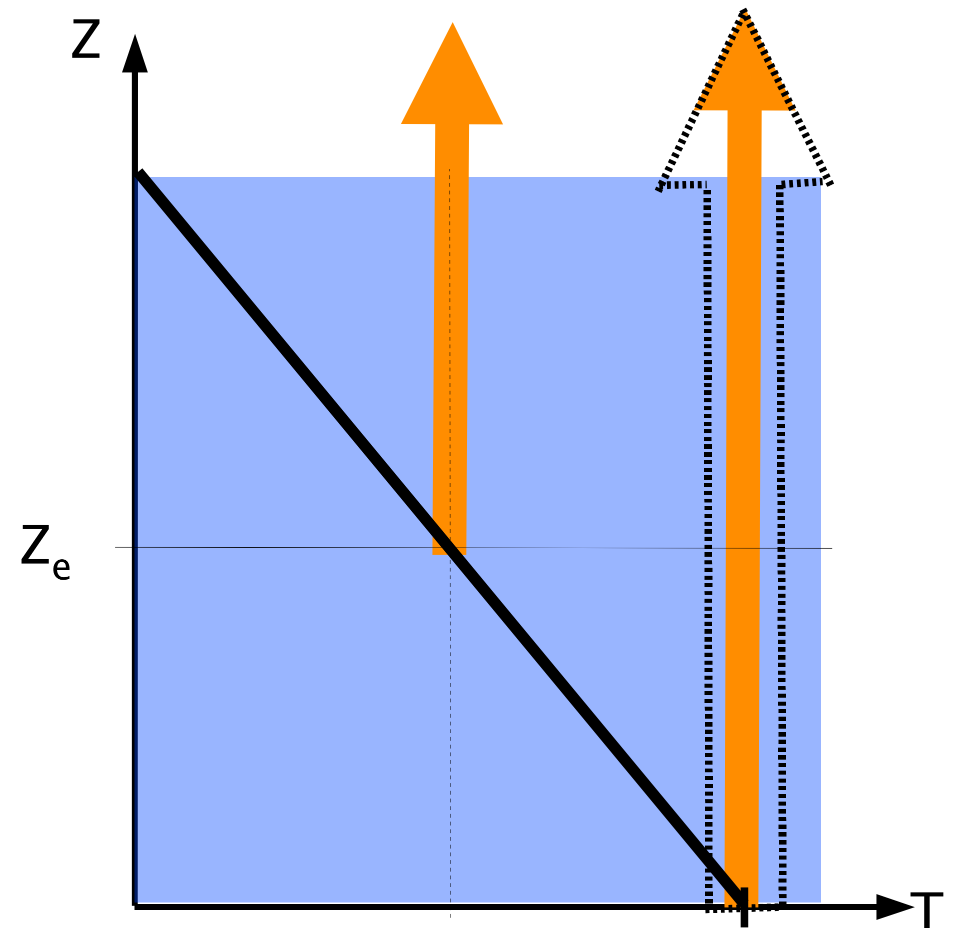


Effet de serre dans un milieu isotherme ou stratifié

Rayonnement IR sortant : **$\epsilon.\sigma.T(z_e)^4$**

Ze: altitude d'émission vers l'espace



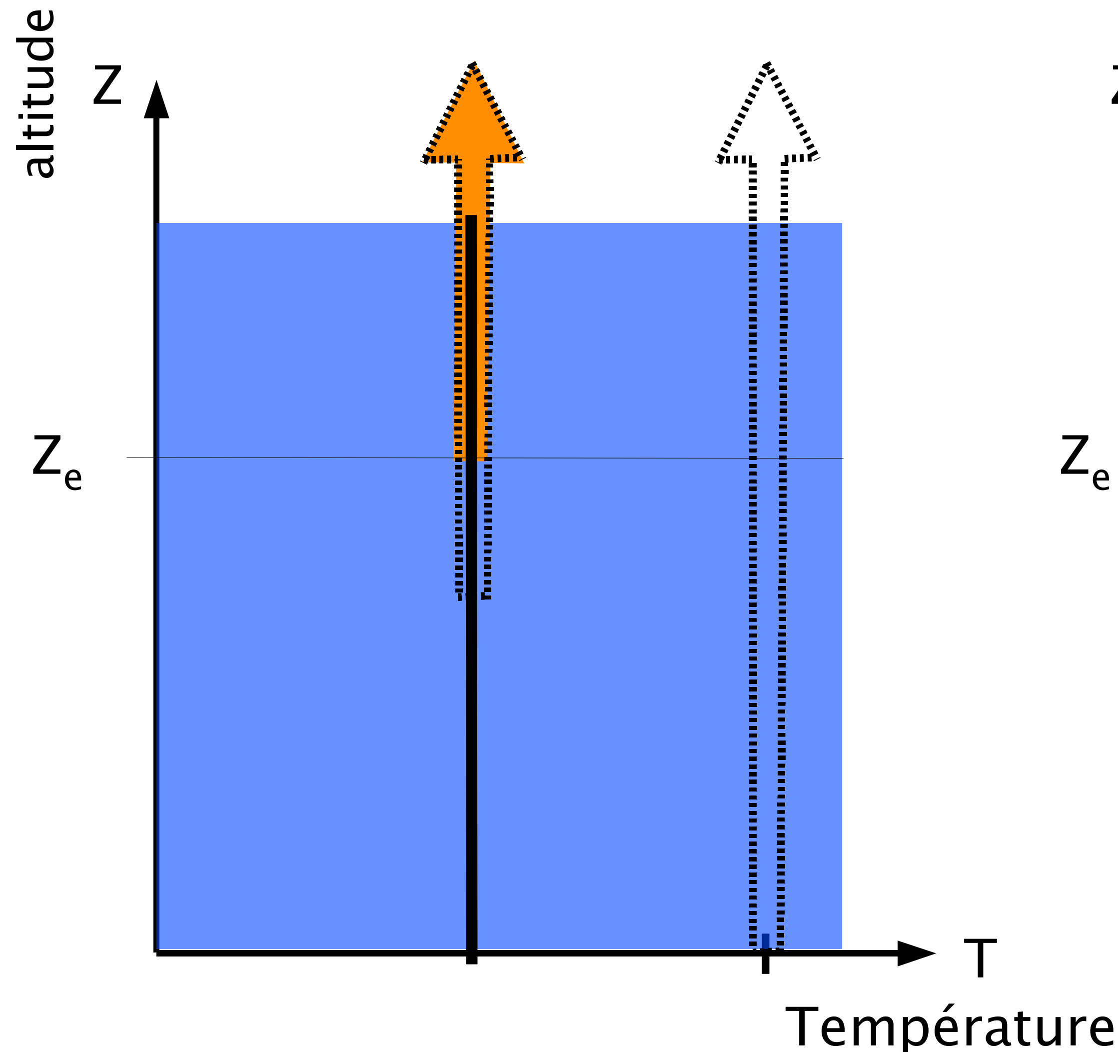


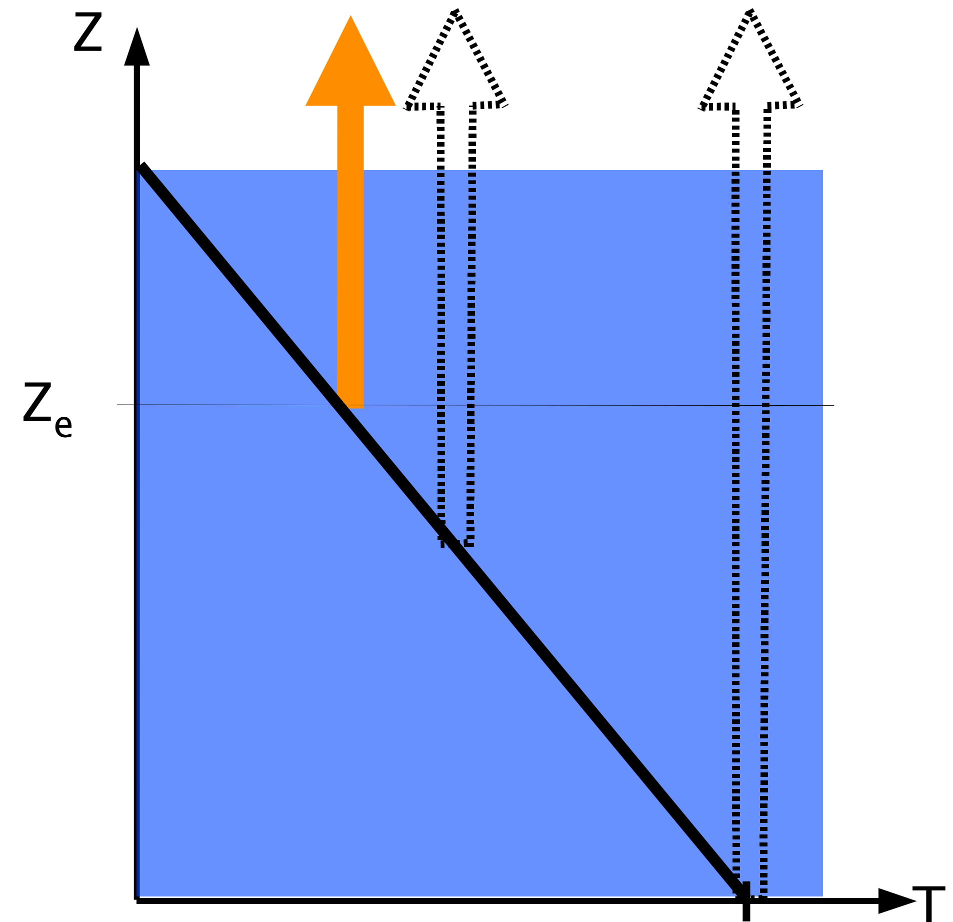
Température

Effet de serre dans un milieu isotherme ou stratifié

Rayonnement IR sortant : $\mathbf{\epsilon.\sigma.T(z_e)^4}$

Ze: altitude d'émission vers l'espace

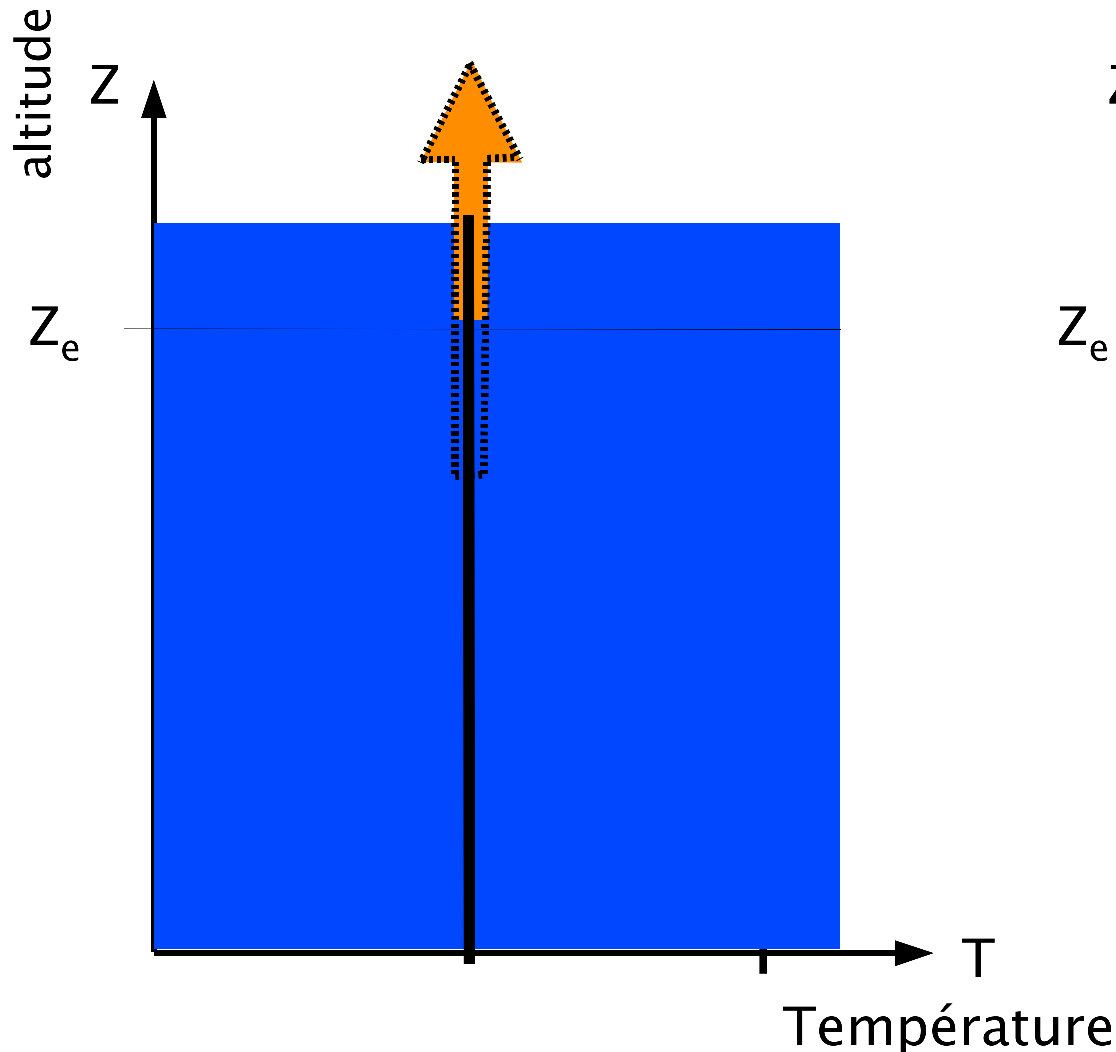


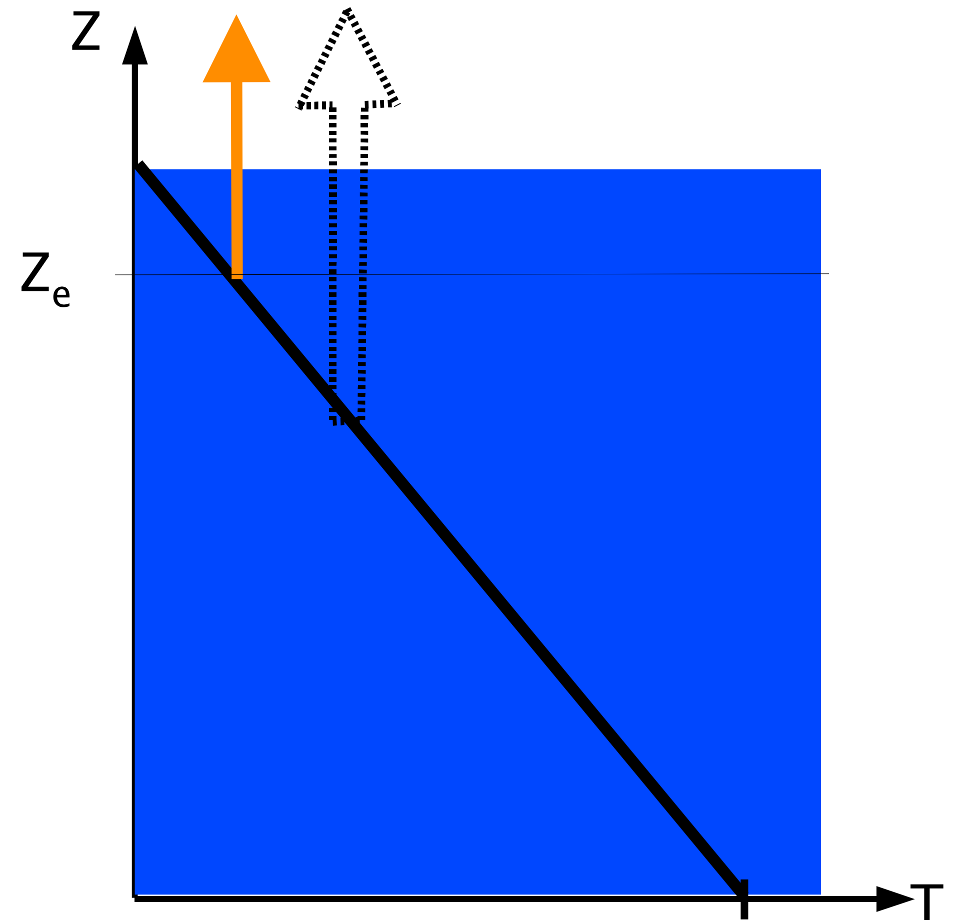


Effet de serre dans un milieu isotherme ou stratifié

Rayonnement IR sortant : $\epsilon.\sigma.T(z_e)^4$

Ze: altitude d'émission vers l'espace

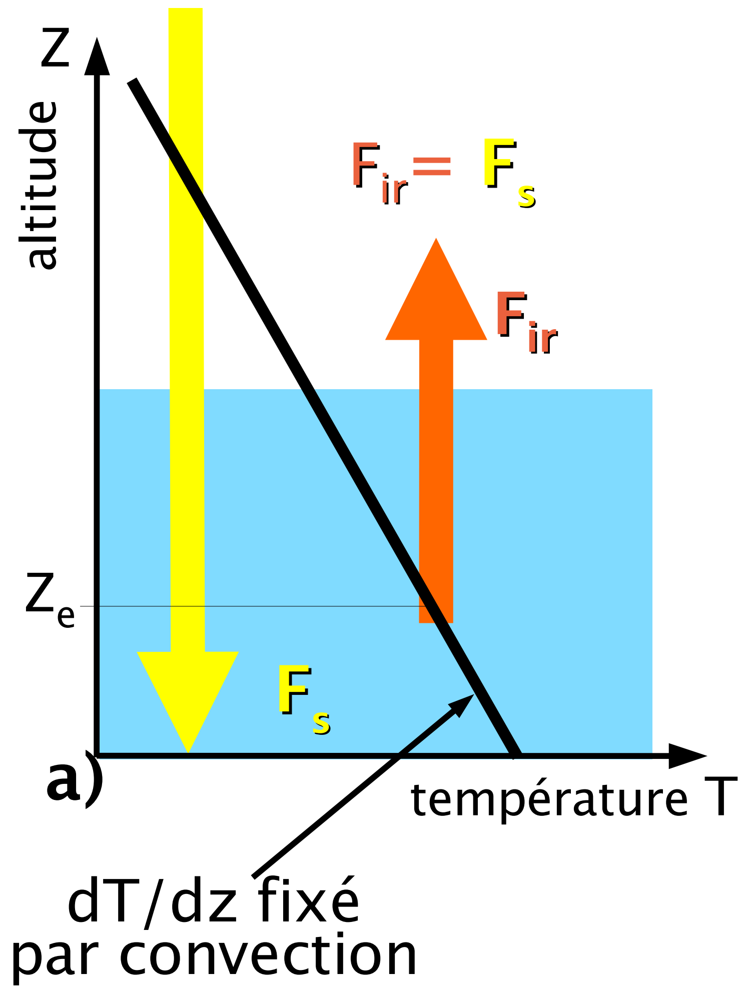




Effet de serre dans une atmosphère stratifiée.

Rayonnement solaire net F_s

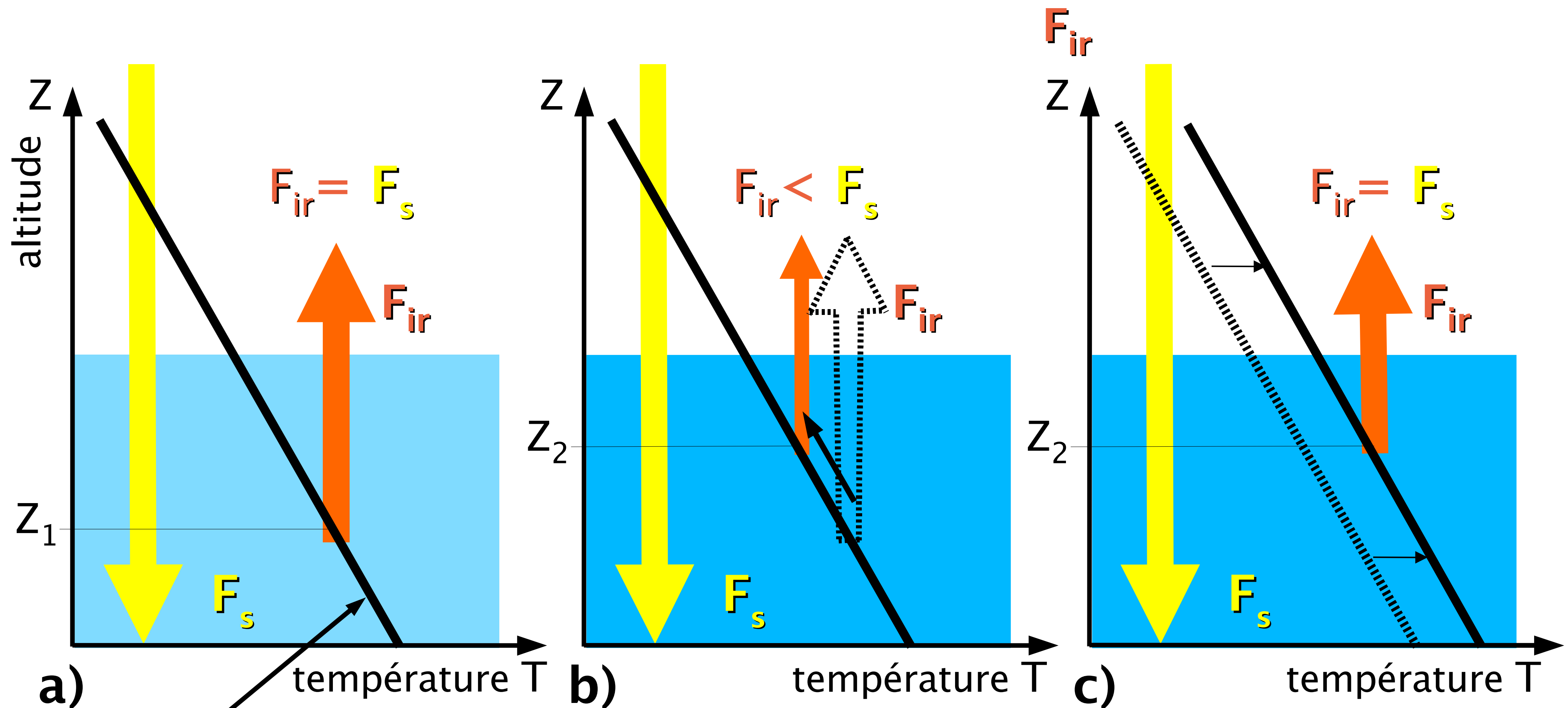
Rayonnement IR sortant F_{ir}



Ze: altitude d'émission vers l'espace

Effet de serre dans une atmosphère stratifiée.

Rayonnement solaire net F_s Rayonnement IR sortant

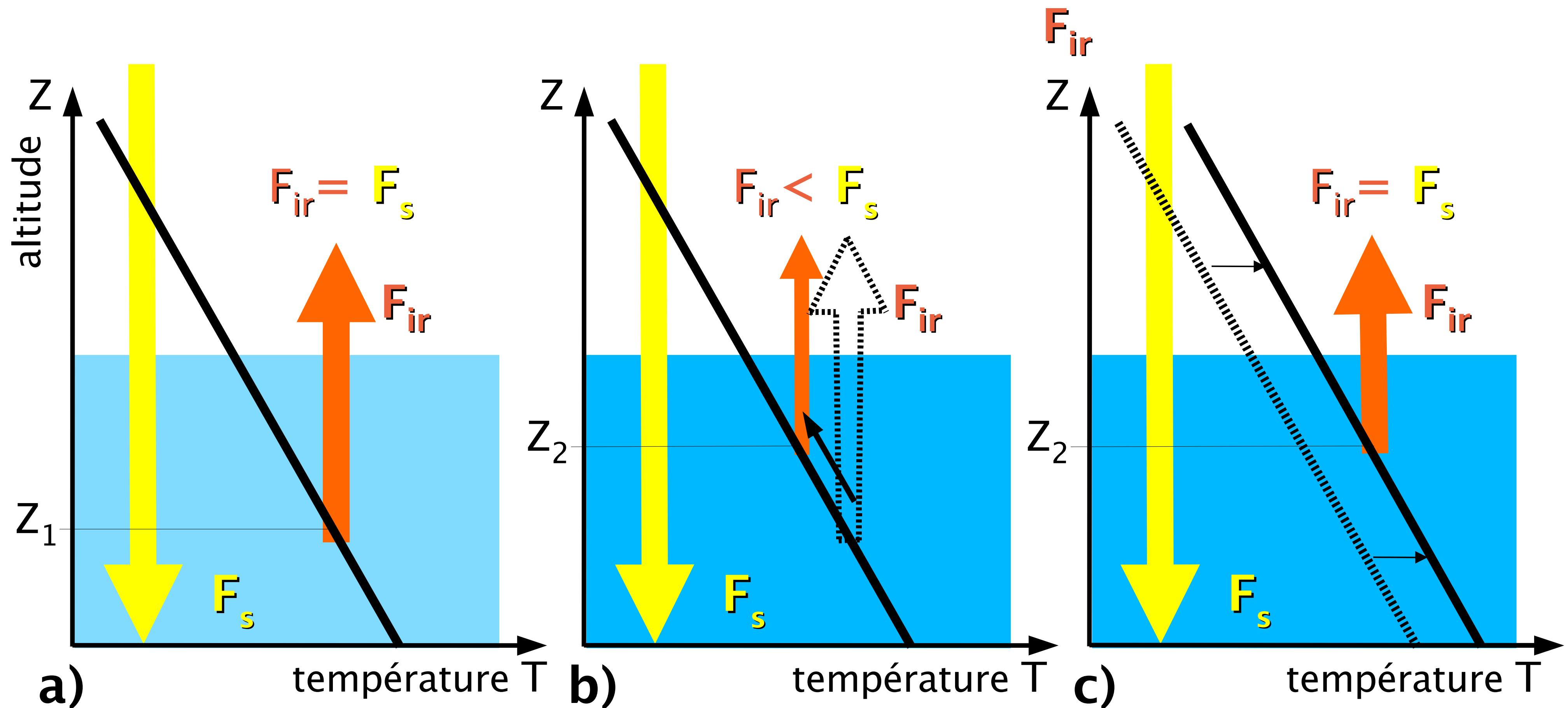


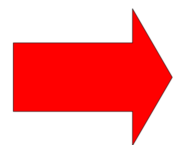
dT/dz fixé
par convection

GES (CO_2) augmente, Z_e augmente, T_e diminue: Rayonnement sortant plus faible.

T(z) augmente: Retour à l'équilibre

Effet de serre dans une atmosphère stratifiée.

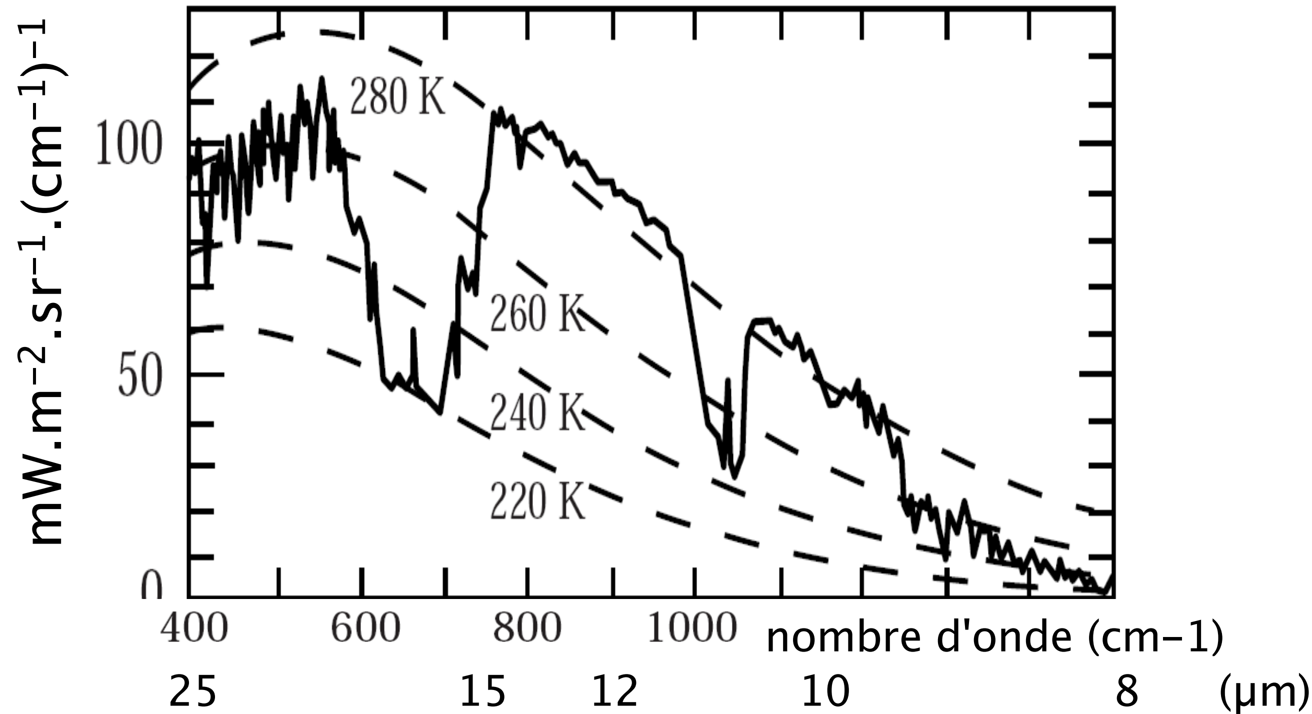




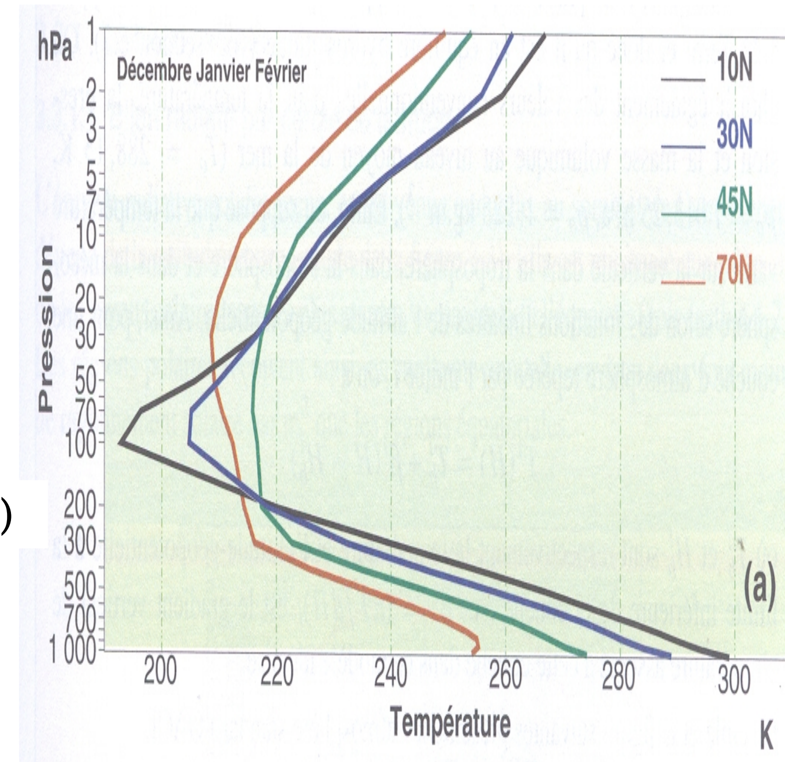
Pour une atmosphère stratifiée, il faut considérer les **flux au sommet de l'atmosphère**, et non les flux en surface (premiers calculs fin des années 1960)

Rayonnement émis par la terre et l'atmosphère

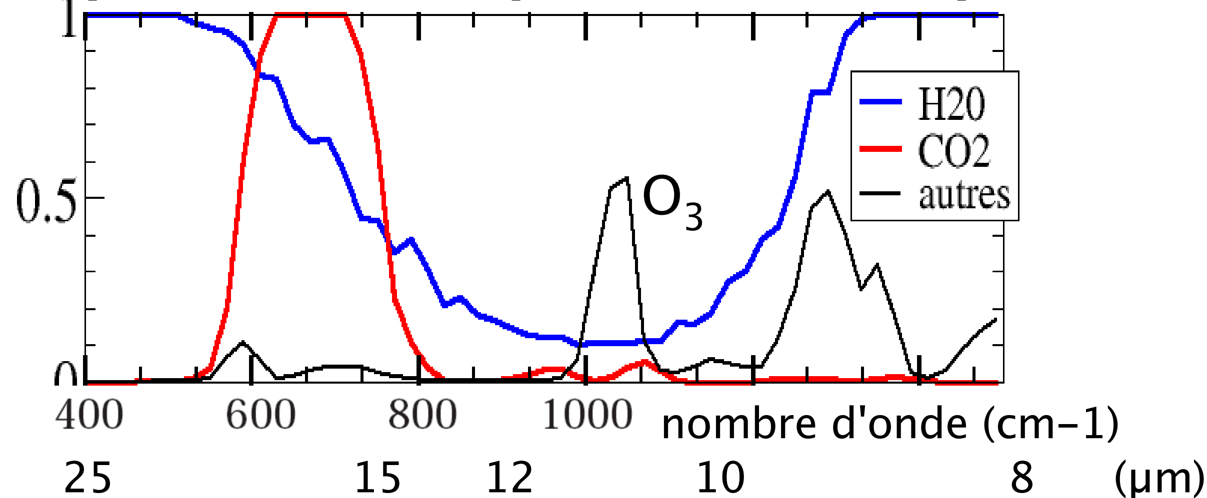
Spectre infra-rouge observé par satellite



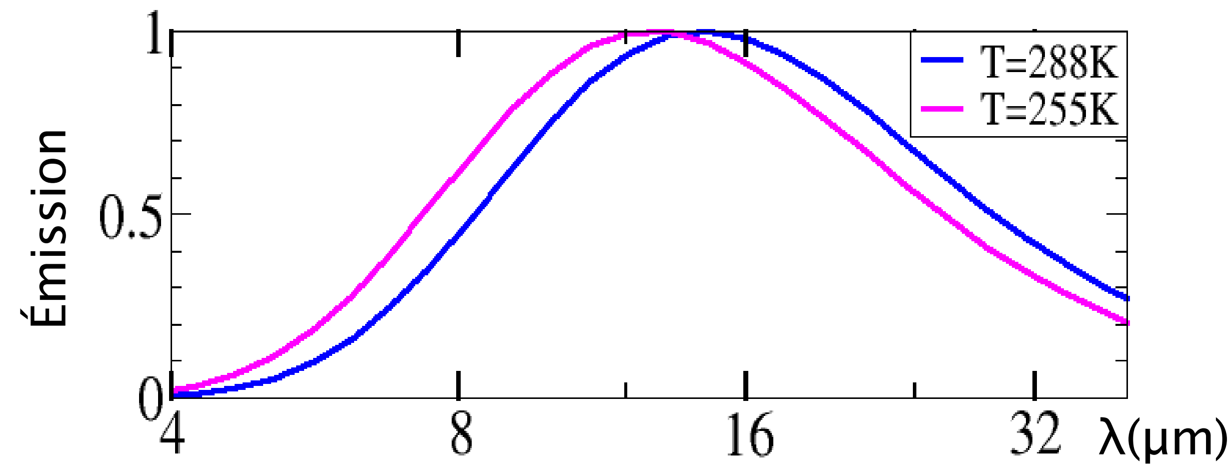
Profil verticaux de température

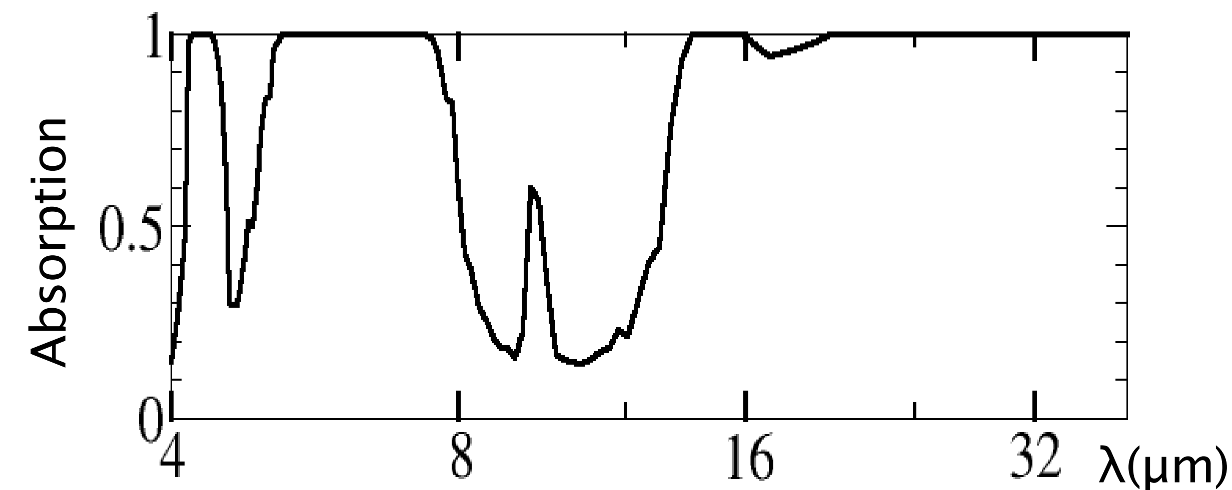


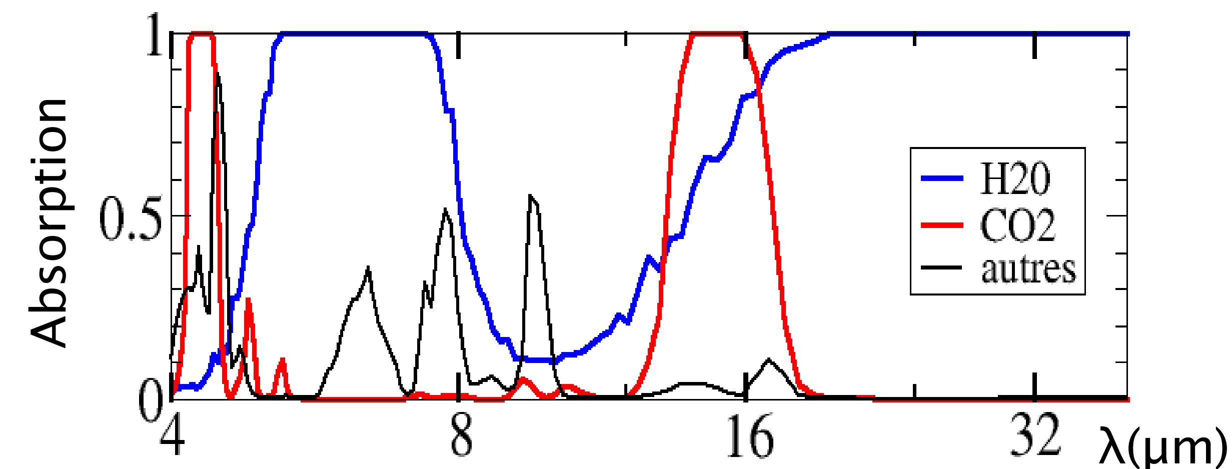
Spectre d'absorption de l'atmopshère



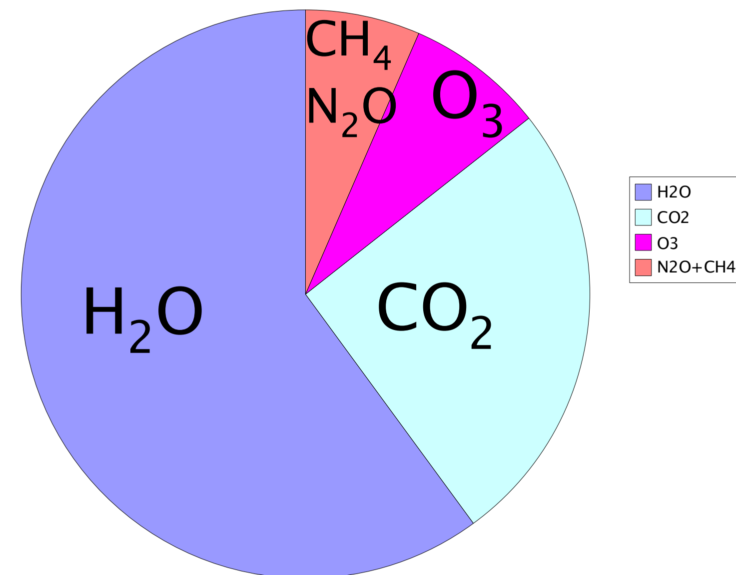
L'effet de serre sur Terre







Contribution à l'effet de serre

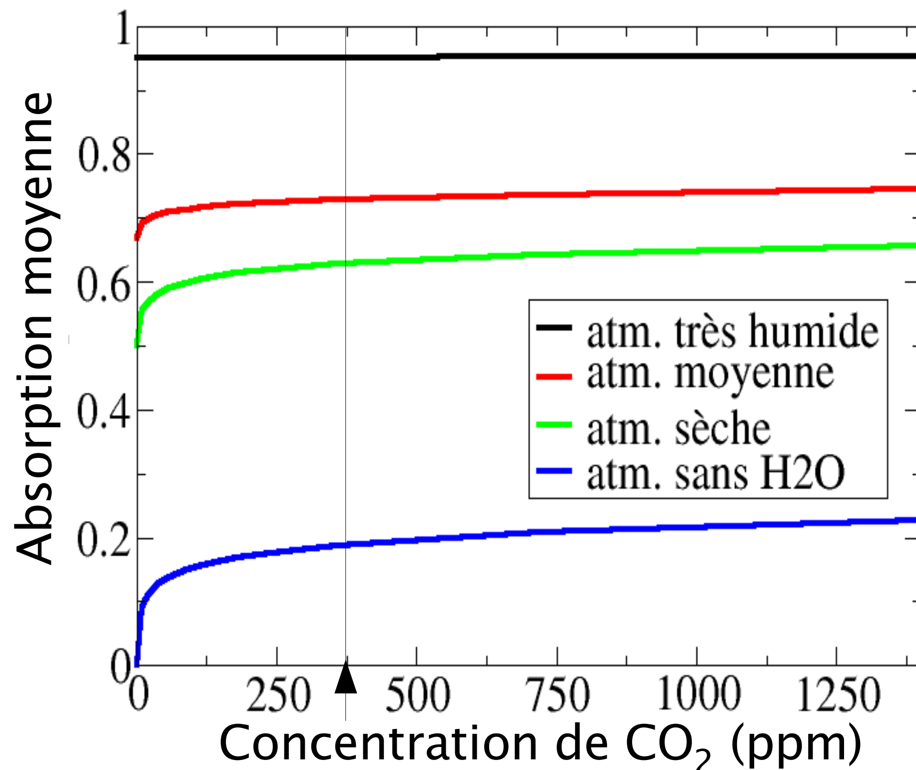


Effet de serre:

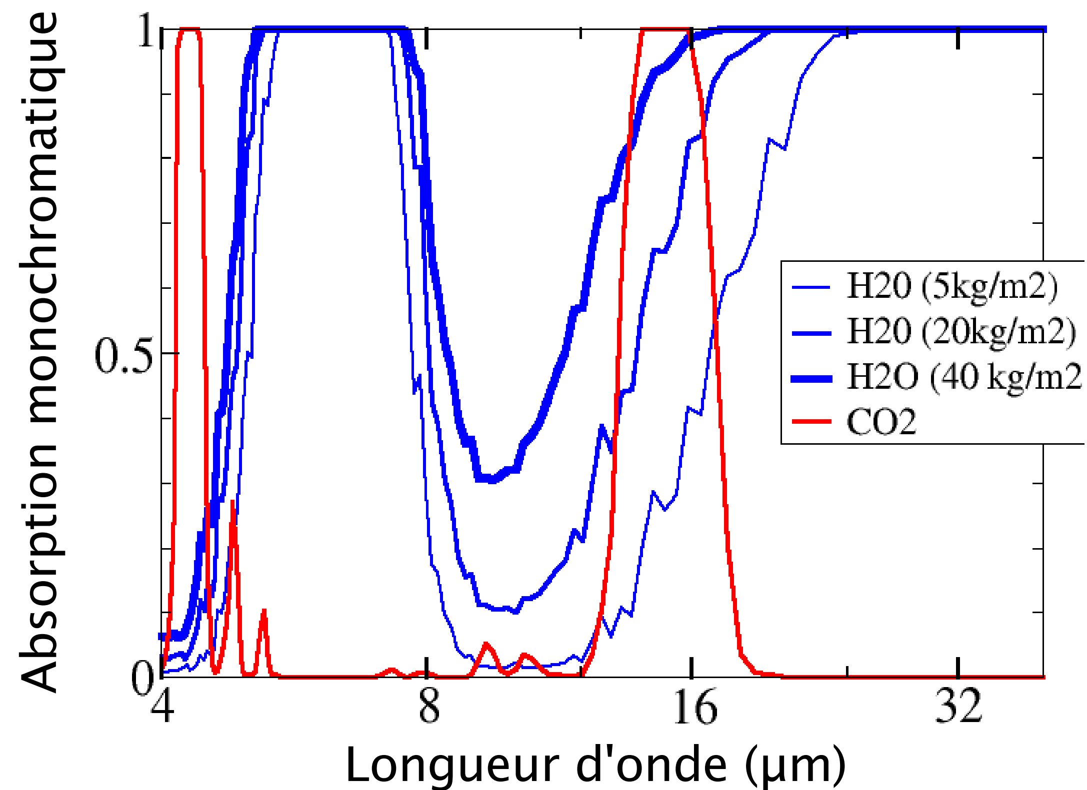
Vapeur d'eau	60%
CO_2	26%
Ozone	8%
N_2O+CH_4	6%

Effet de saturation

Absorption de l'atmosphère **moyennée** sur le domaine infra-rouge en fonction du CO_2, pour différentes valeurs de H_20

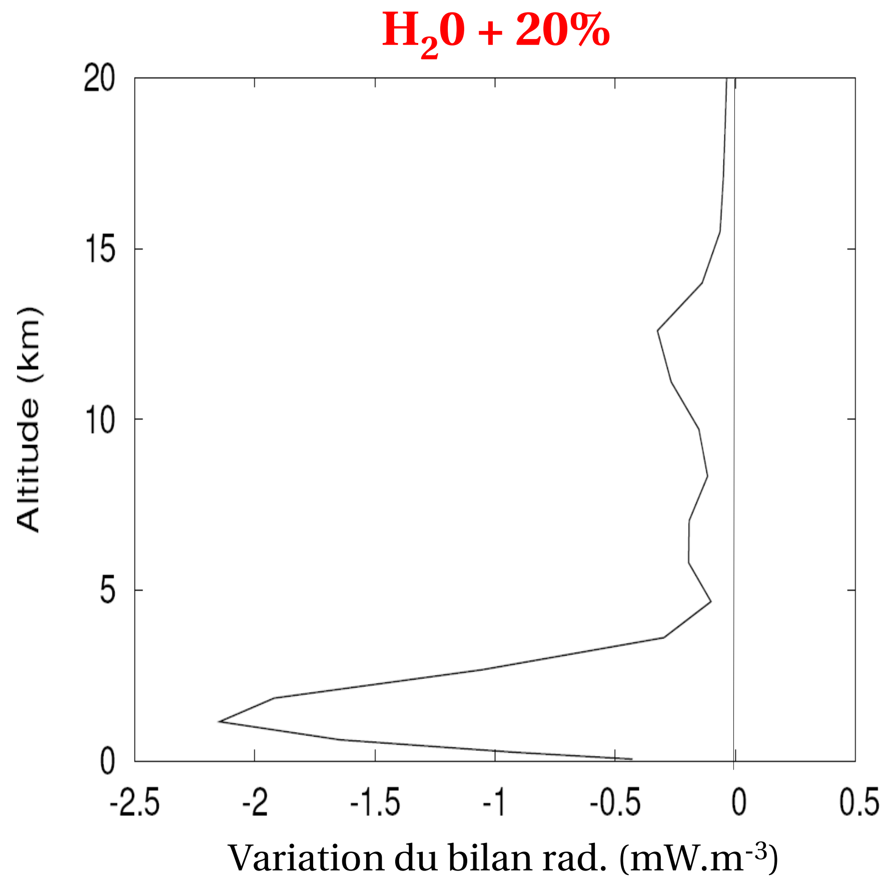


Absorption monochromatique de l'atmosphère due au CO_2 et à H_20, pour différente concentration de H_20



Analyse de l'effet de serre sur Terre

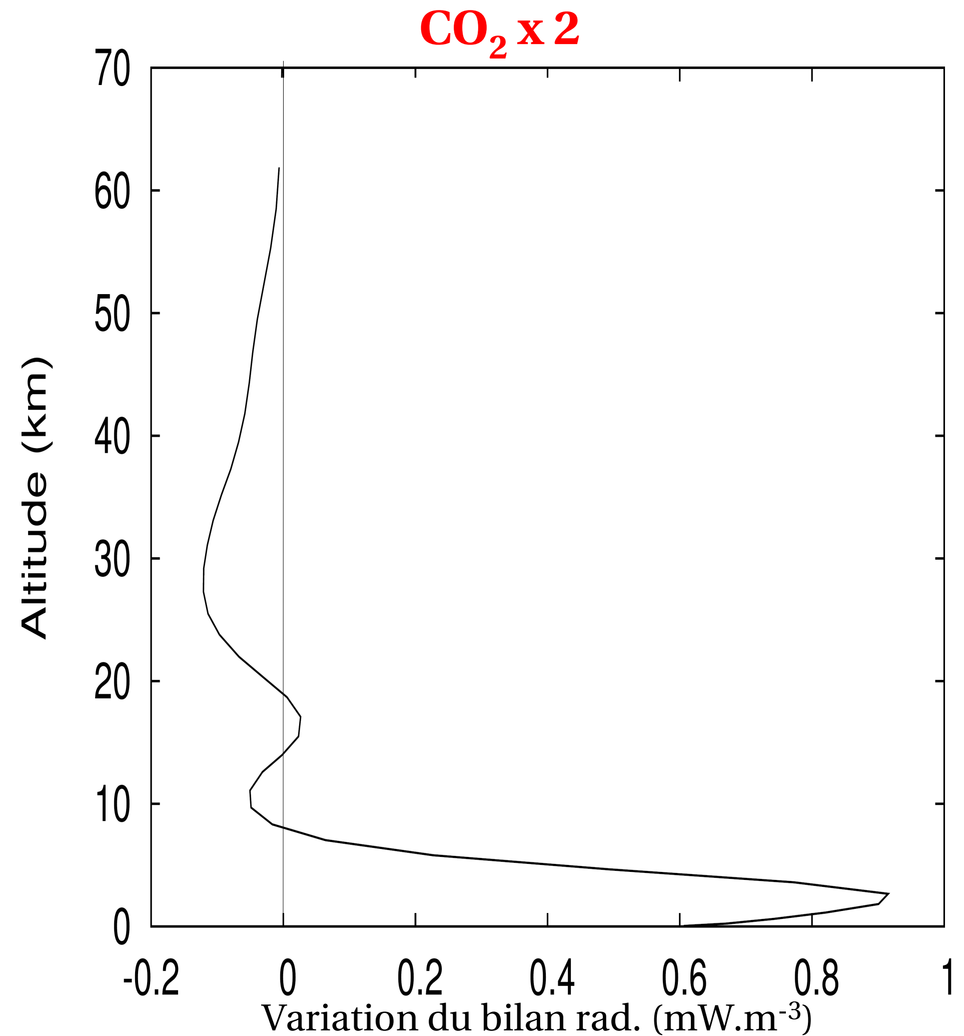
Variation des bilans radiatifs



Surface: **+ 12,1 W.m^{-2}**

Atmosphère: **- 8,1 W.m^{-2}**

Espace: - 4,0 W.m^{-2}



Surface: **+ 1,5 W.m^{-2}**

Atmosphère: **+ 1,3 W.m^{-2}**

Espace: - 2,8 W.m^{-2}

L'effet de serre: un phénomène physique réel... mais mal nommé

• Dans les serres horticoles, le réchauffement est principalement dû à la limitation des échanges par évaporation et convection
• Sur Terre les échanges entre la surface et l'atmosphère sont également dominés par l'évaporation-condensation, mais ce sont les échanges par rayonnement infrarouge qui contrôlent le refroidissement vers 'espace

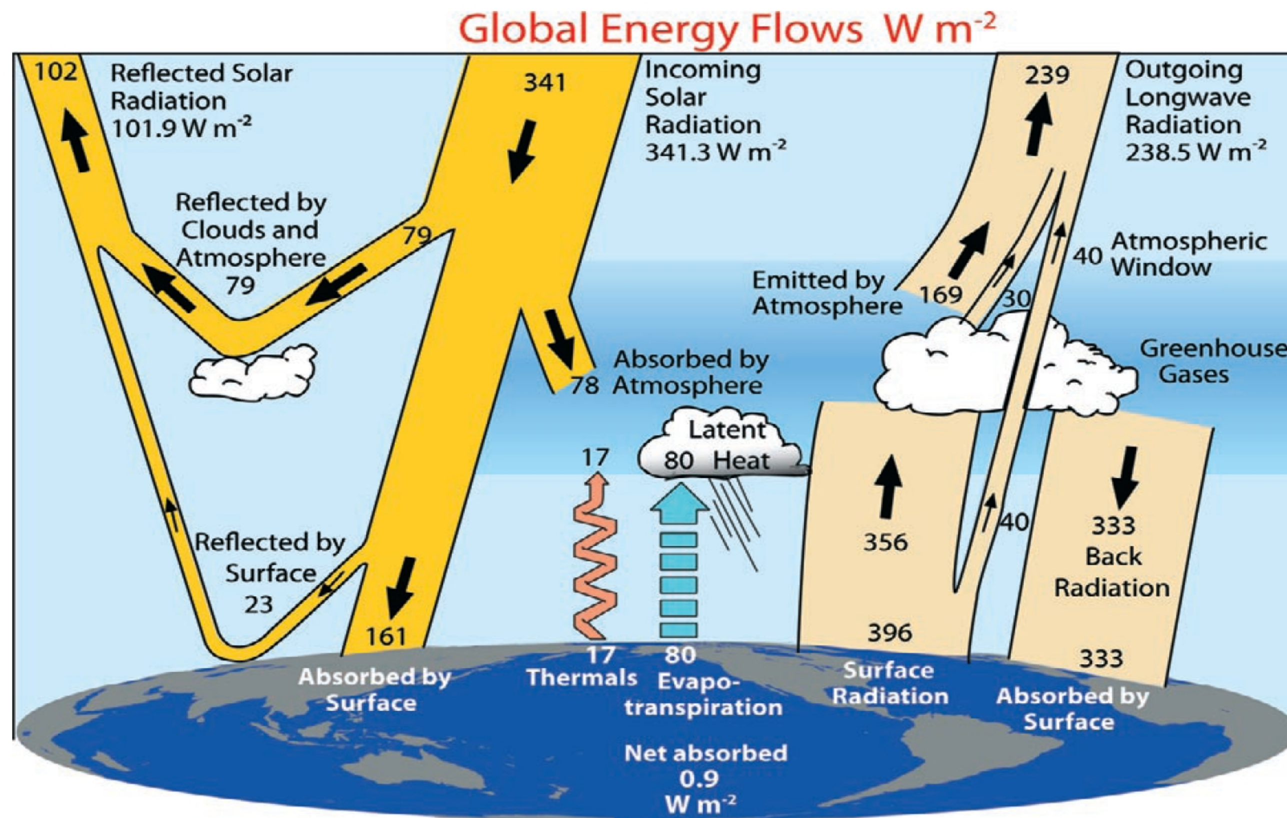
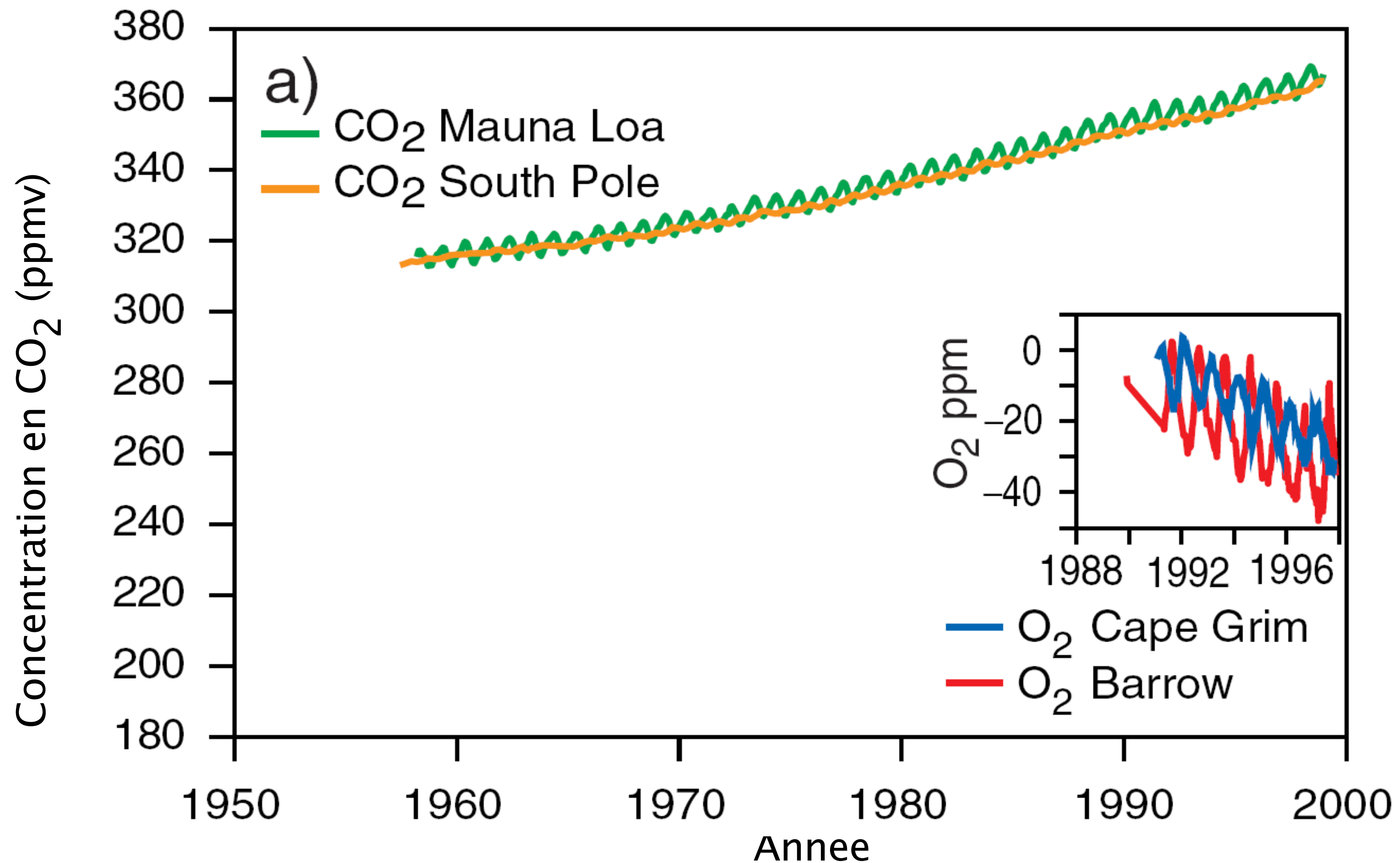


Fig. 1. The global annual mean Earth's energy budget for the Mar 2000 to May 2004 period (W m^{-2}). The broad arrows indicate the schematic flow of energy in proportion to their importance.

[Trenberth et al., BAMS, 2009]

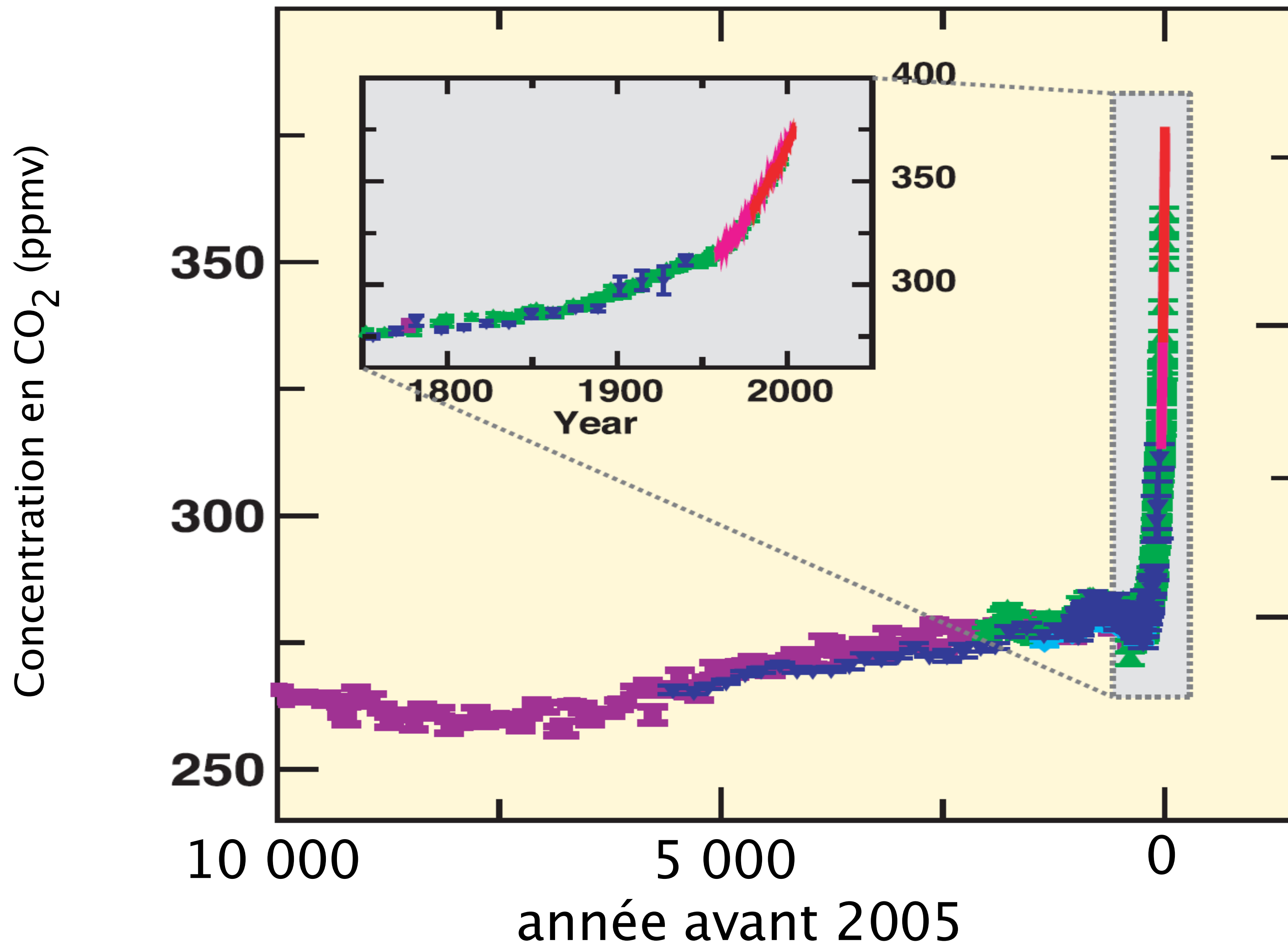
Changements climatiques récents

La concentration de CO_2: on la mesure directement à partir des années 1960, et elle augmente!



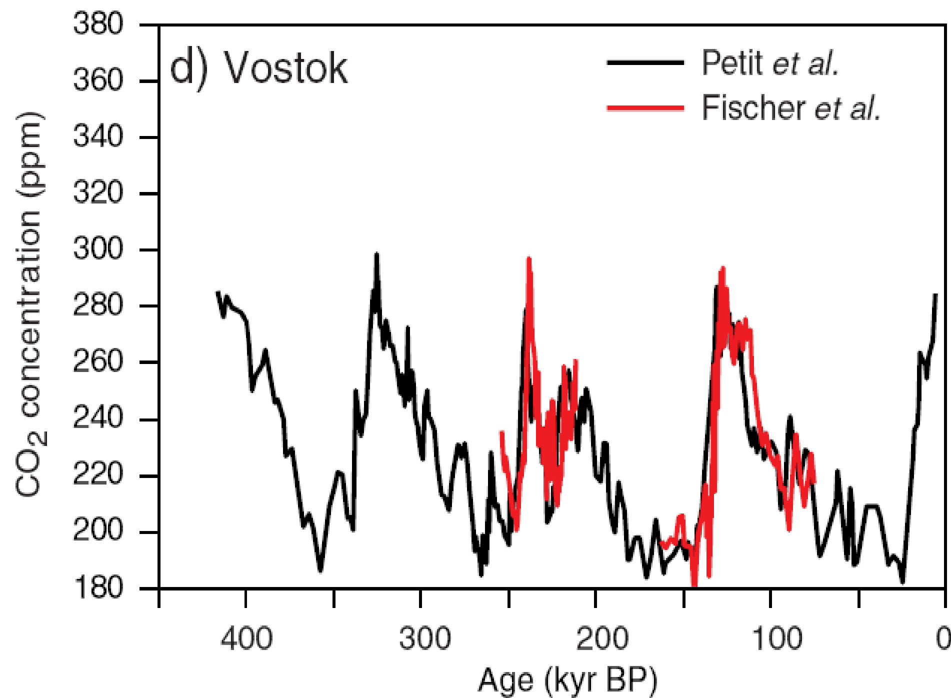
Source: GIEC 2001

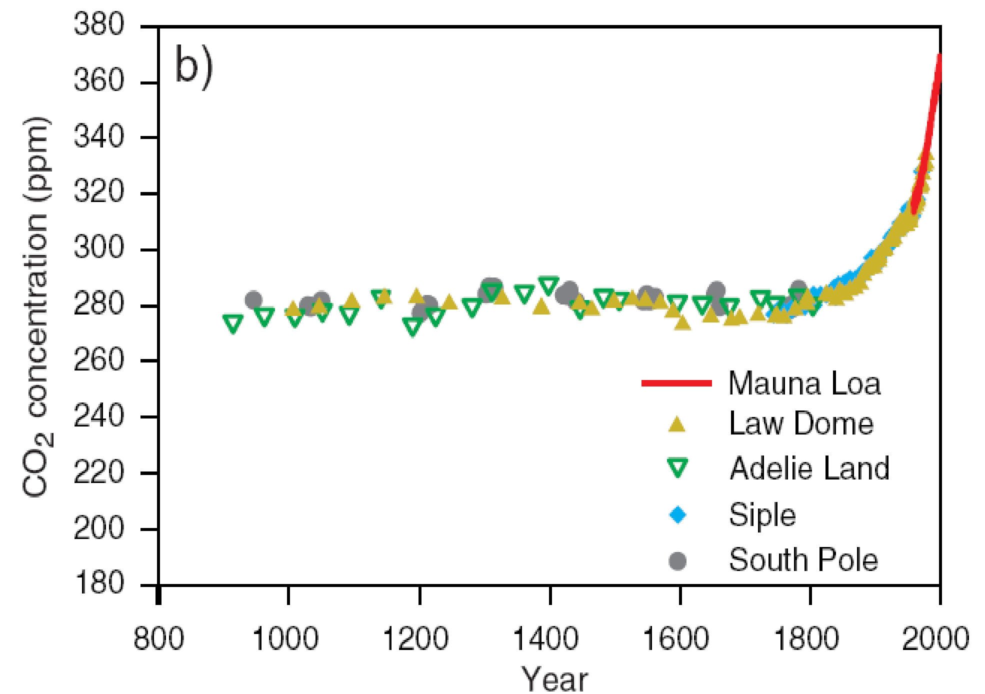
La concentration de CO_2: évolution depuis 10 000 ans



Source: GIEC 2007

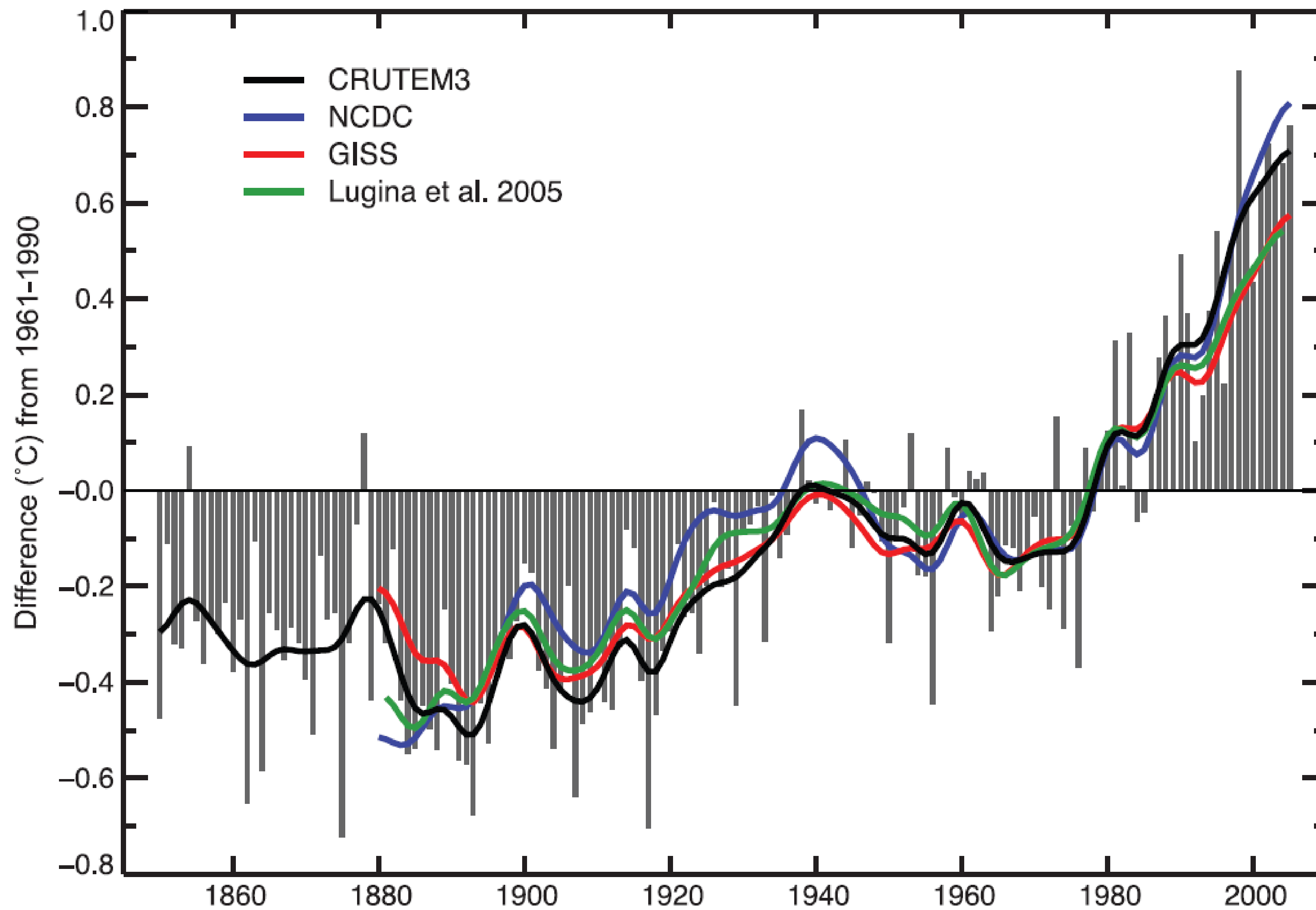
Les variations récentes de CO_2 aux regards des variations passées.





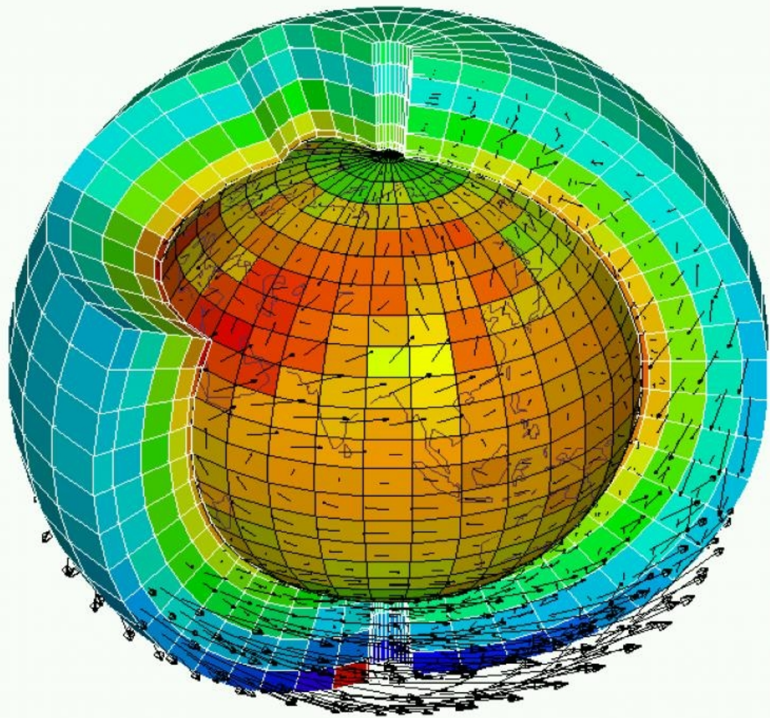
Source: GIEC 2007

Depuis un siècle, le climat se réchauffe et change.



Source: GIEC 2007

Comment le climat est-il modifiée par ces perturbations radiatives?



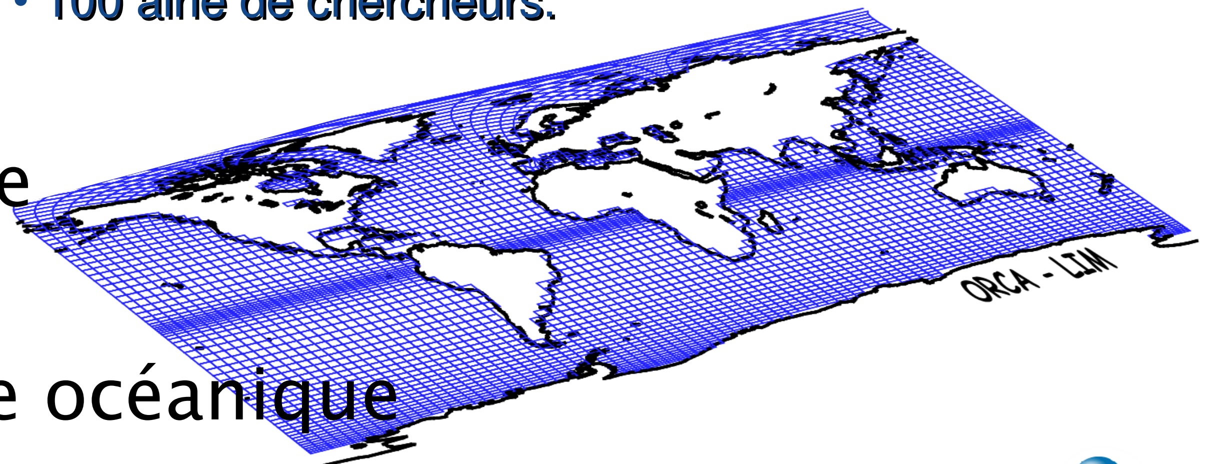
Maillage atmosphérique

Modélisation numérique du climat :

- basée sur les équations de la physique
- mise en oeuvre sur un ordinateur (dimension finie)
- Importance des processus sous-maille (nuages, ...)

Modèle de climat de l'IPSL :

- atmosphère, océan, criosphère, biosphère
- 100 aine de chercheurs.

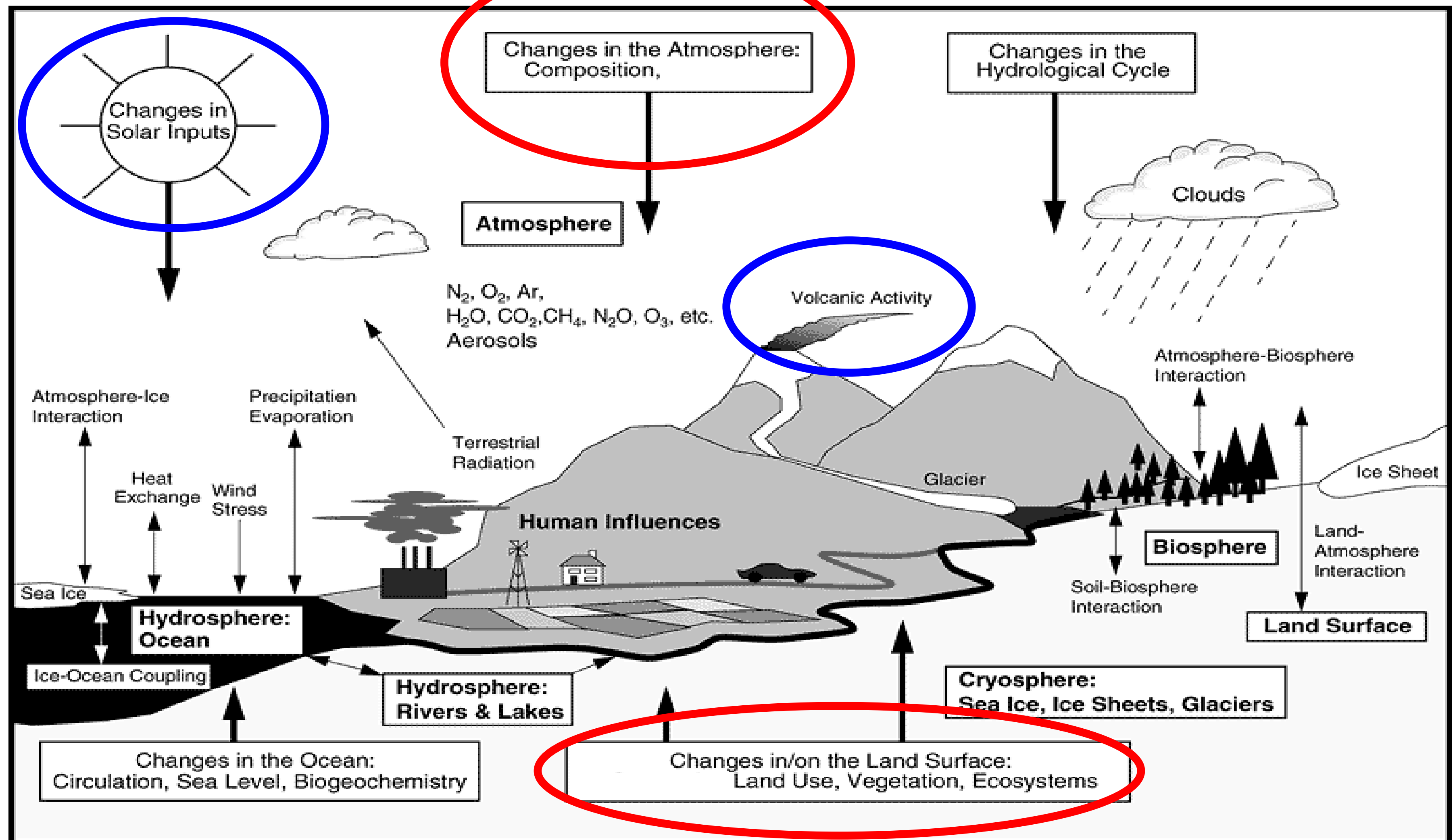


Maillage océanique

Les perturbations du climat

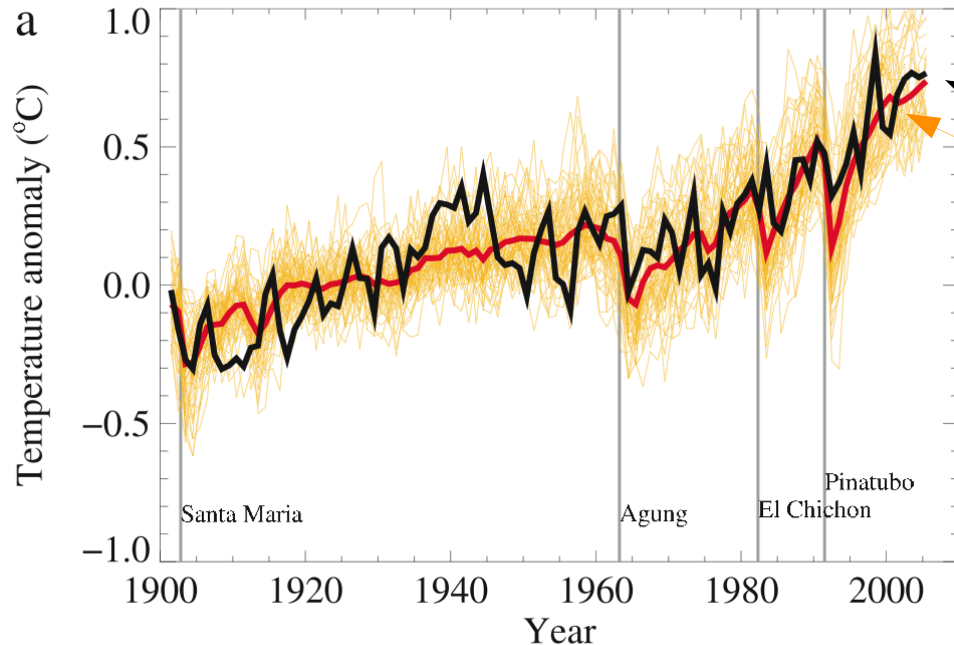
naturelles

anthropiques

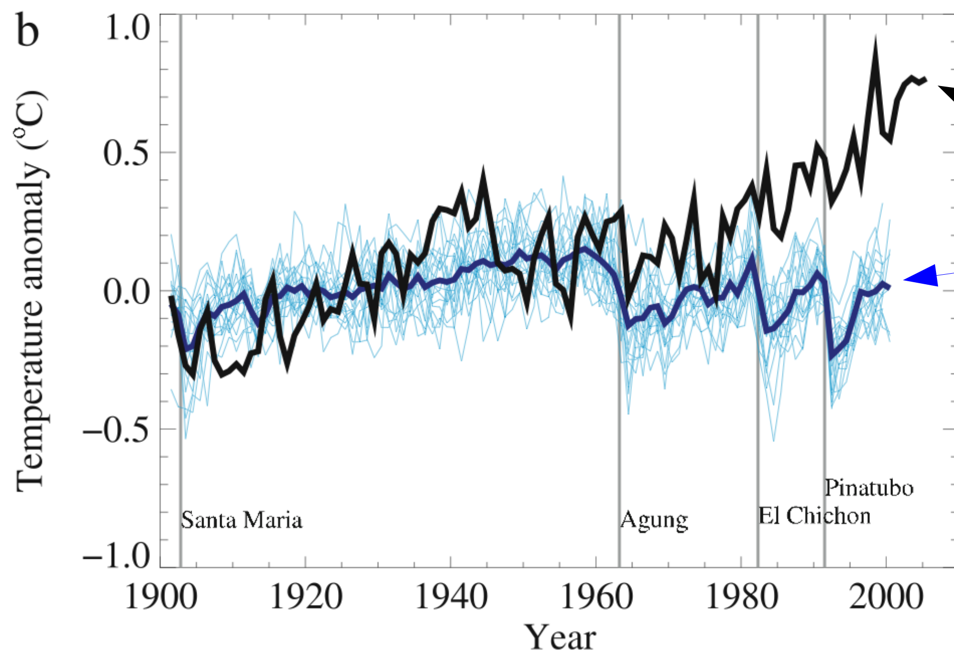


Source: GIEC, 2001

L'homme a-t-il déjà changé le climat ?



Anomalie de **température** de la surface de la Terre
observée et
calculée en prenant en compte les ***perturbations naturelles et les perturbations dues aux activités*** *humaines* (accroissement observé de la quantité de ***gaz à effet de serre et des aérosols)***



Anomalie de température de la surface de la Terre
observée et
calculée en prenant en compte ***uniquement les perturbations naturelles*** (éruptions volcaniques, activité solaire...)

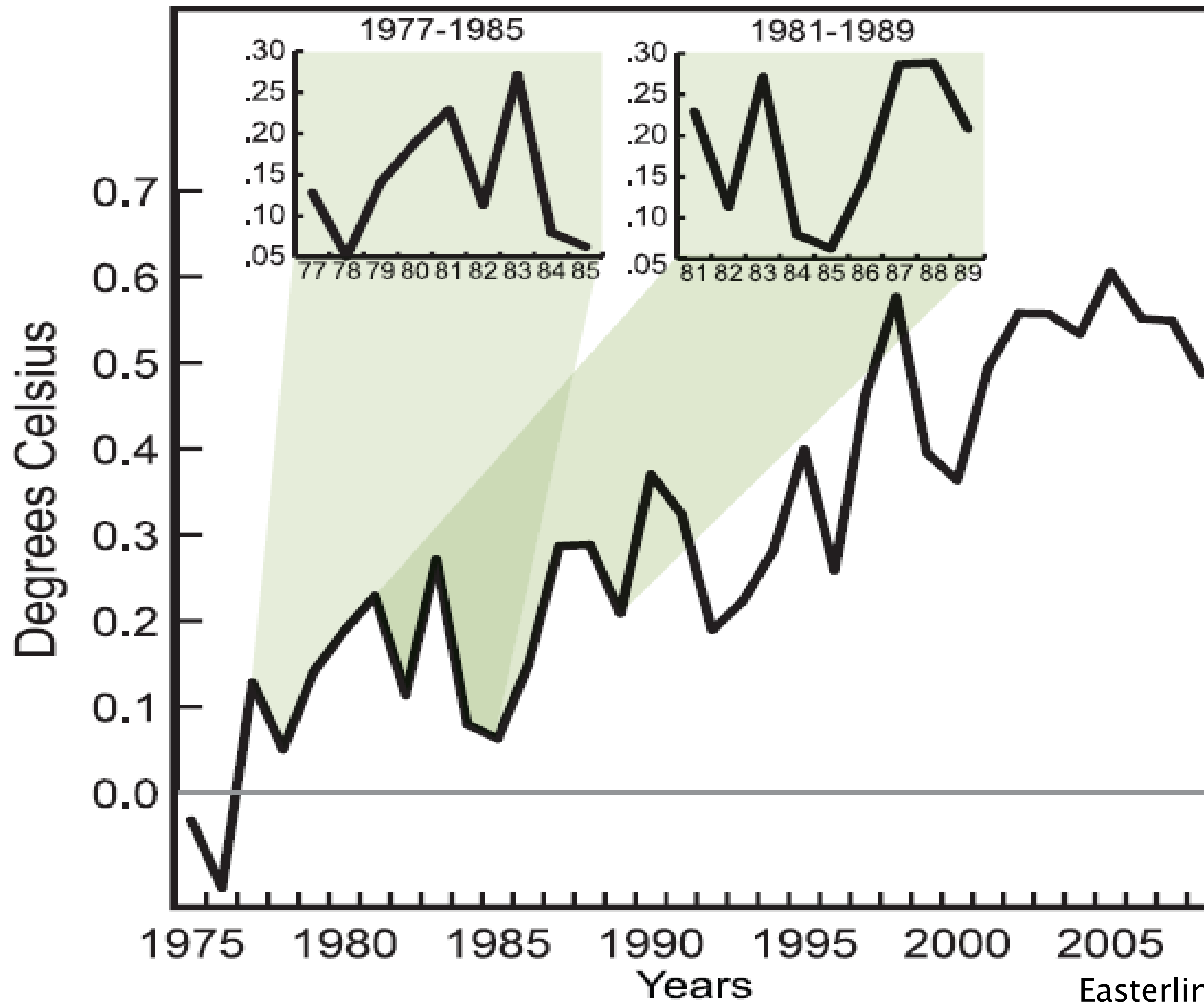
Source: GIEC 2007

Les variations du climat sont elle régulières? Variations et variabilité du climat

- Le climat peut varier en réponse à des “forçages” (perturbations extérieures)
    - Forçages naturels
    - Forçages anthropiques
- Le climat varie, même sans perturbations extérieures (variabilité interne)

Les variations du climat sont elle régulières?
Variations et variabilité du climat

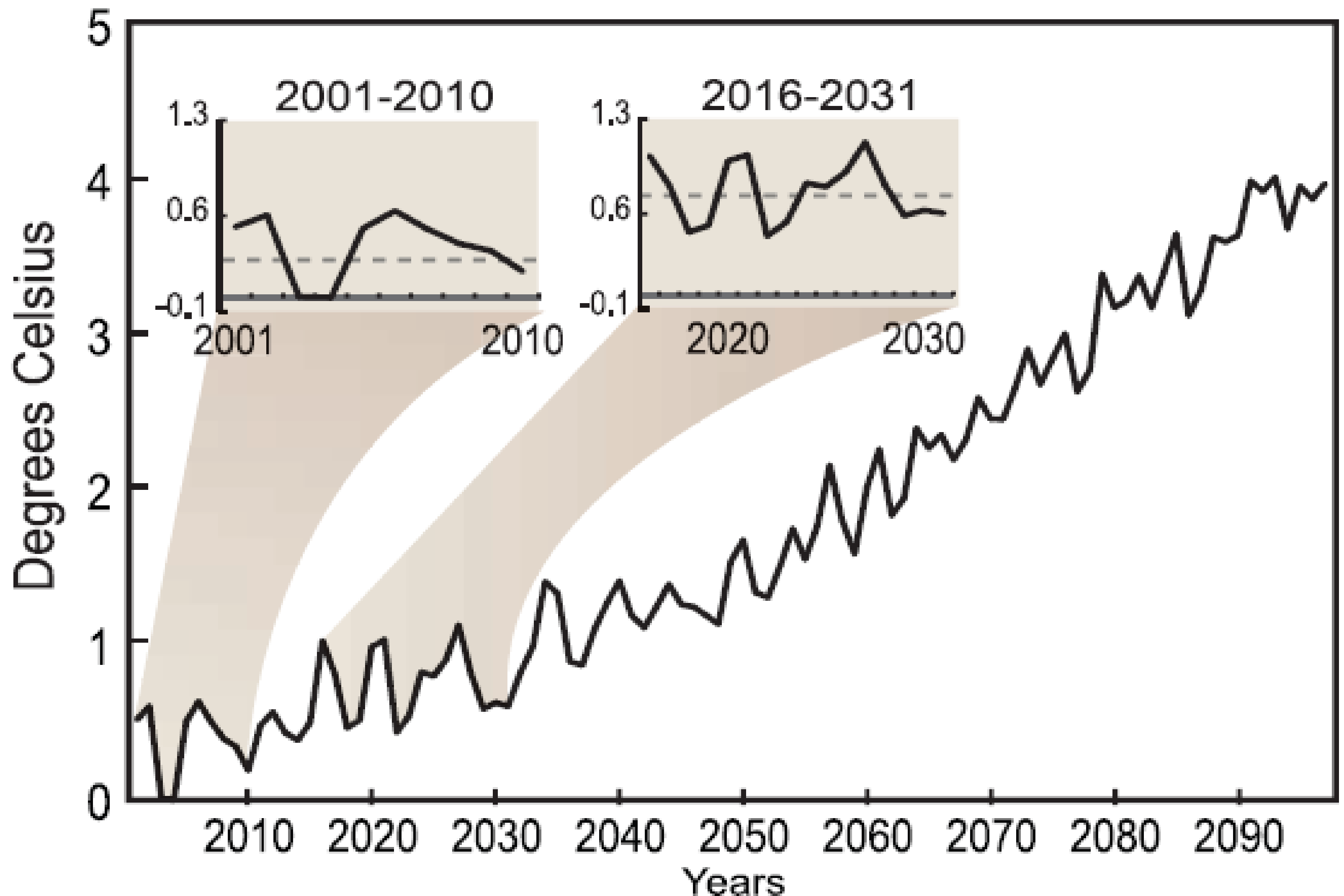
Observée



Easterling and Wehner, 2009

Les variations du climat sont elle régulières? Variations et variabilité du climat

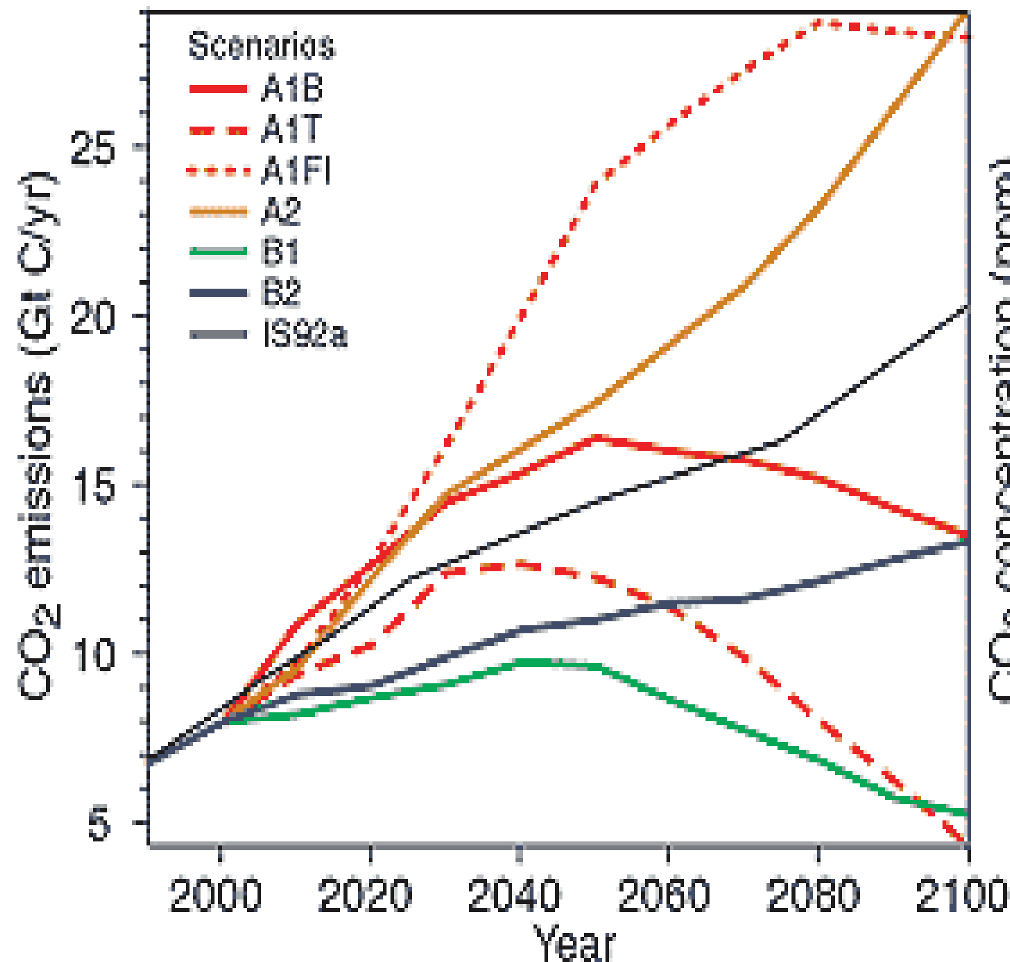
Simulée

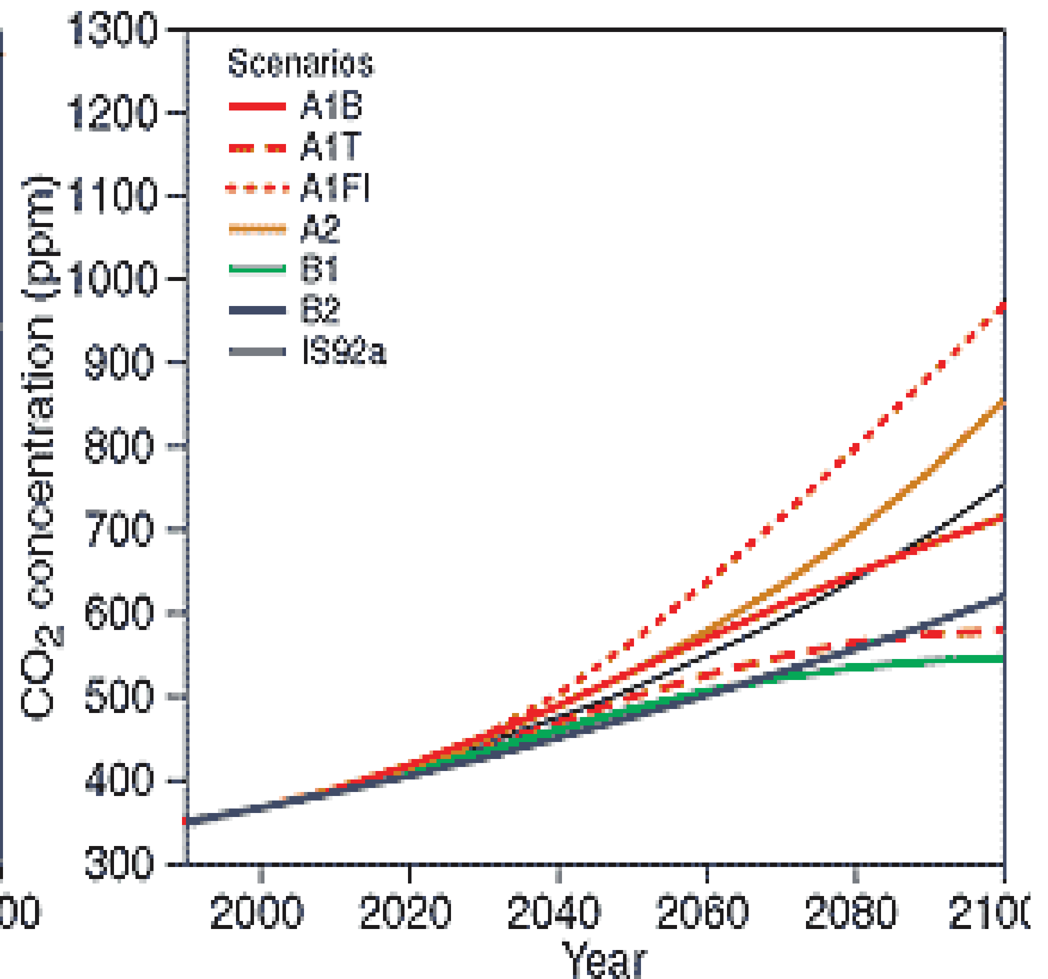


Easterling and Wehner, 2009

Projections pour le futur

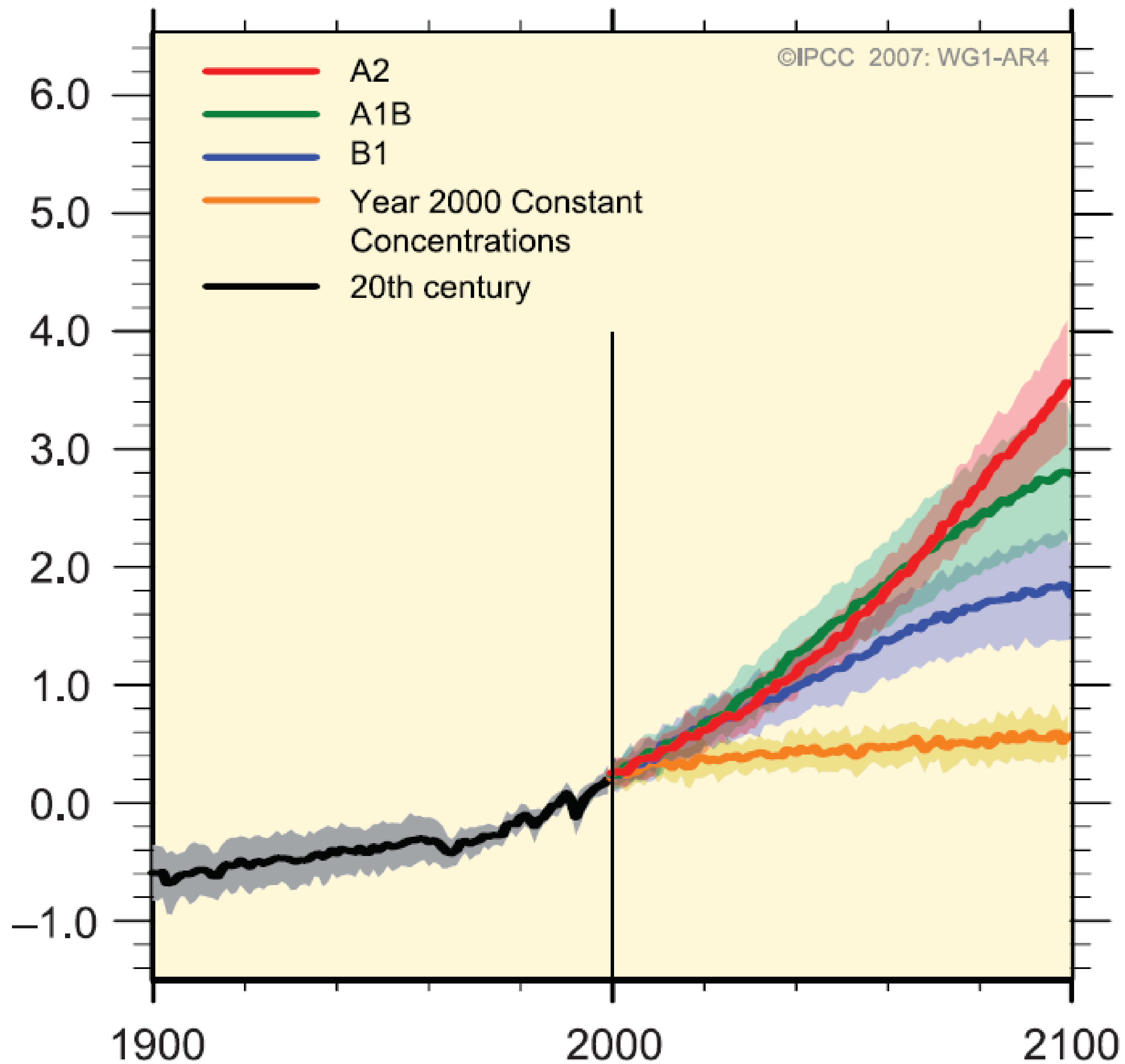
Emissions et concentrations de CO2: utilisation de scénarios





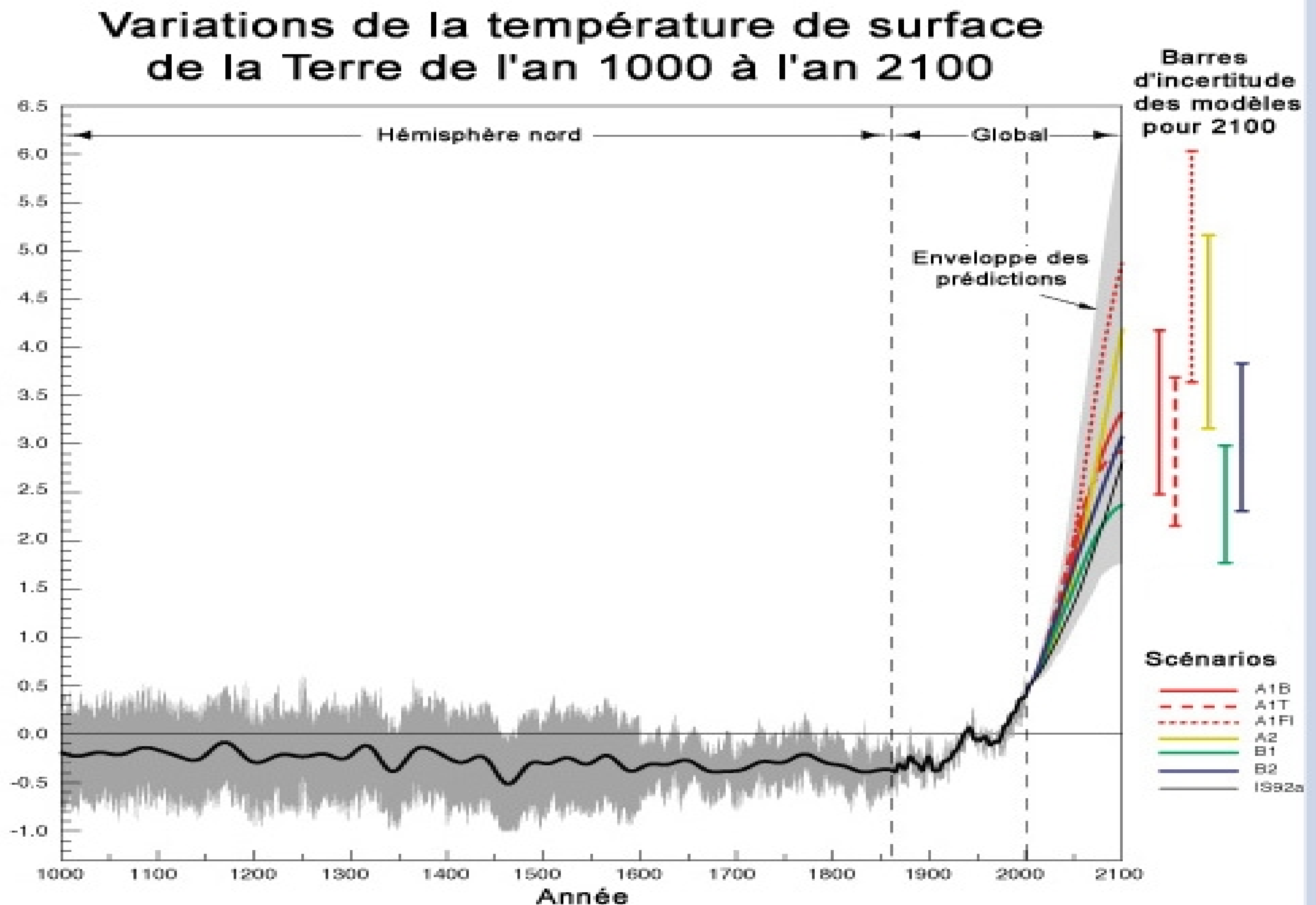
Source: GIEC 2001

Evolution récente et future de la température moyenne



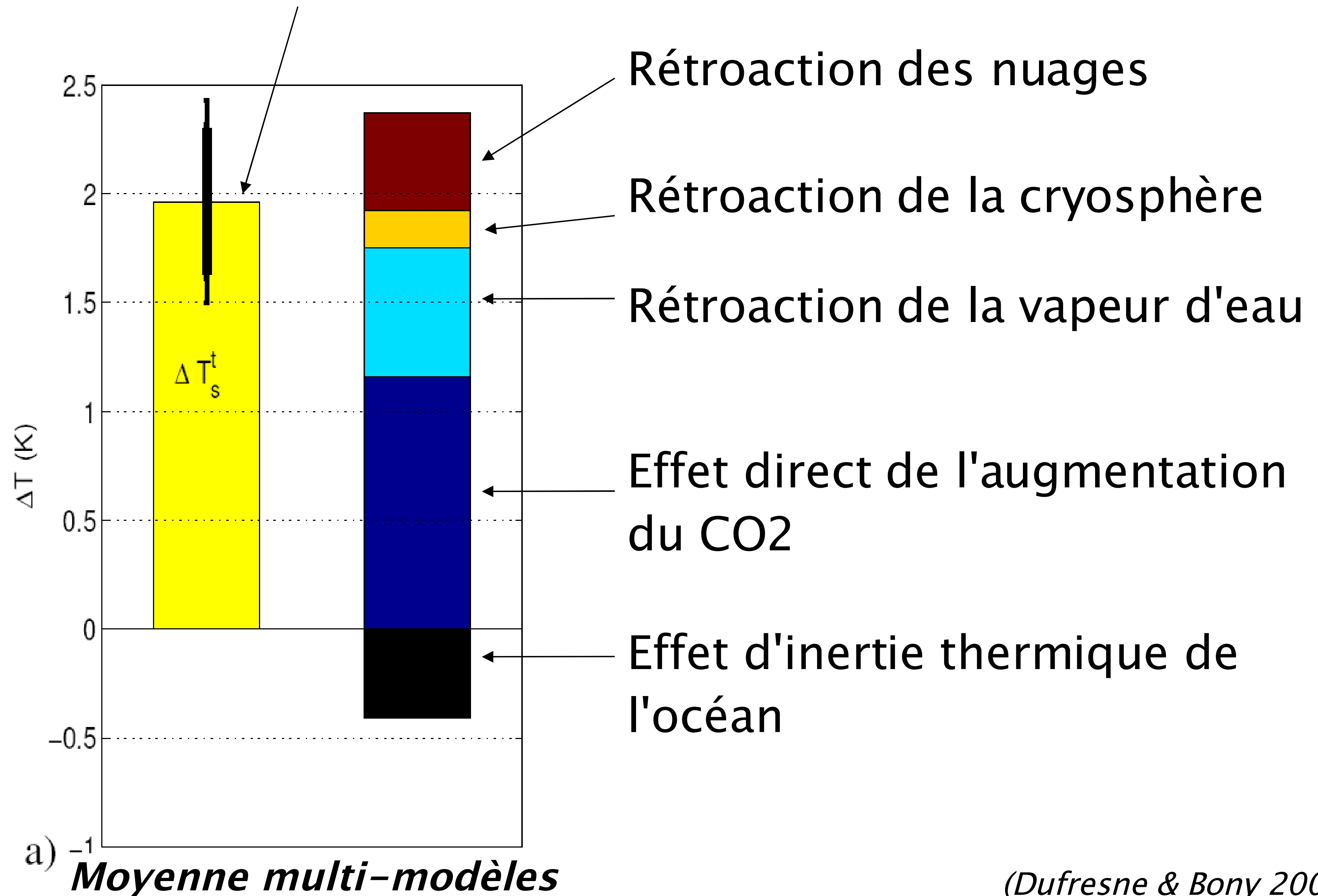
Source: GIEC 2007

Evolution de la température moyenne à l'échelle de 1000 ans



Source: GIEC 2001

Importances des rétroactions

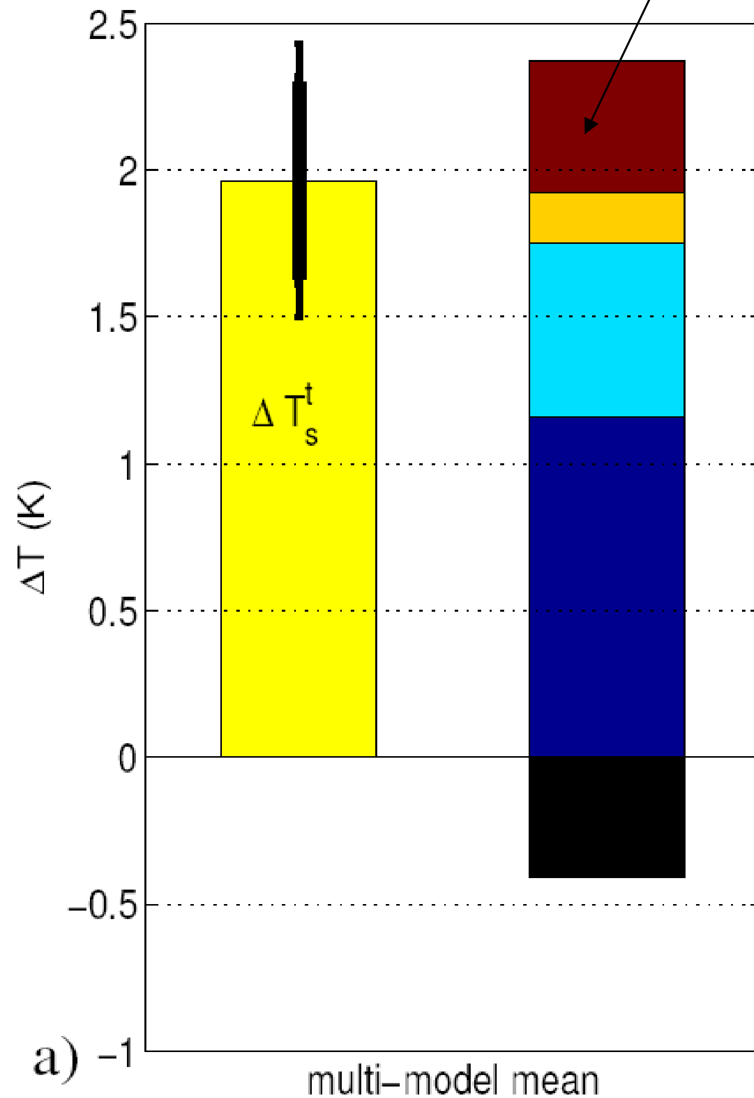


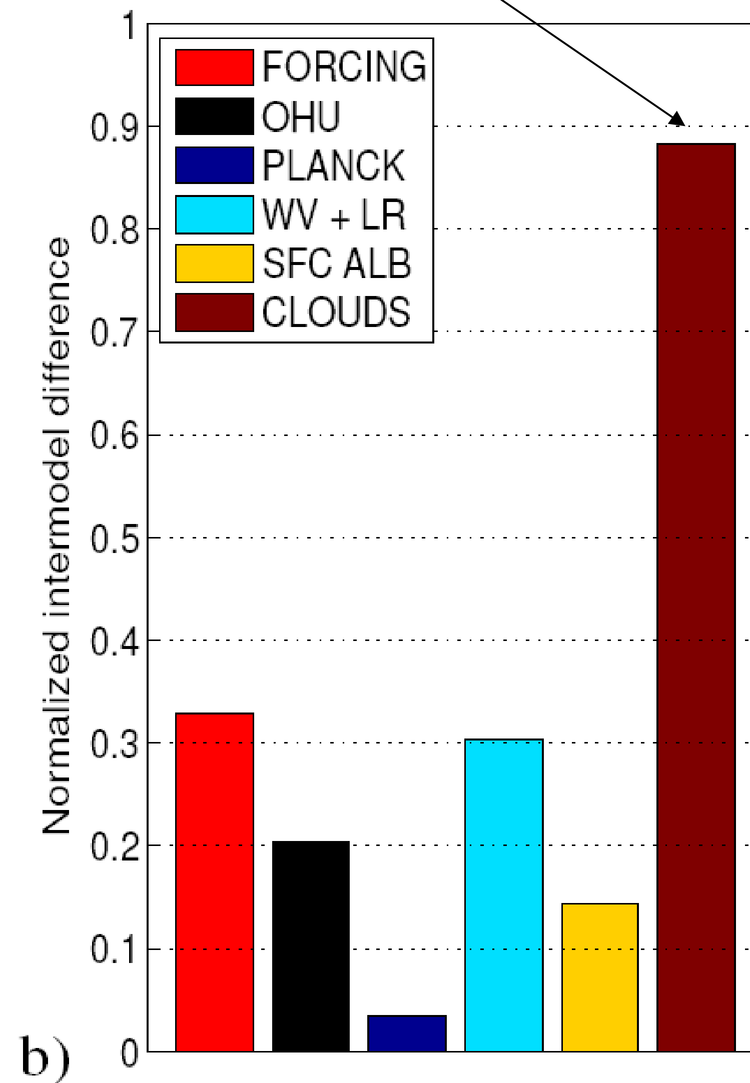
(Dufresne & Bony 2008)

Importances des rétroactions

Moyenne des modèles | Dispersion entre les modèles

Rétroaction des nuages

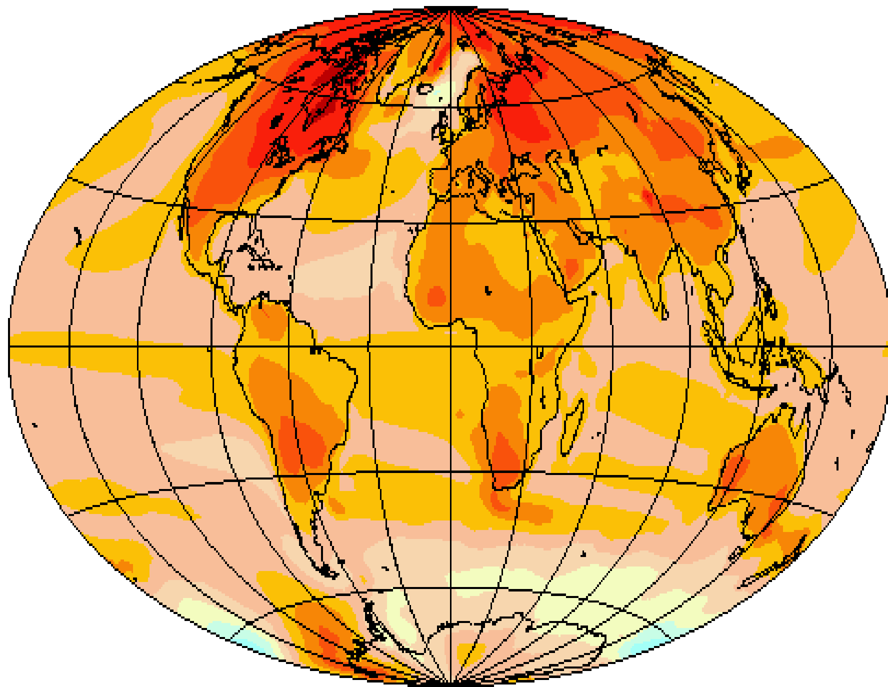




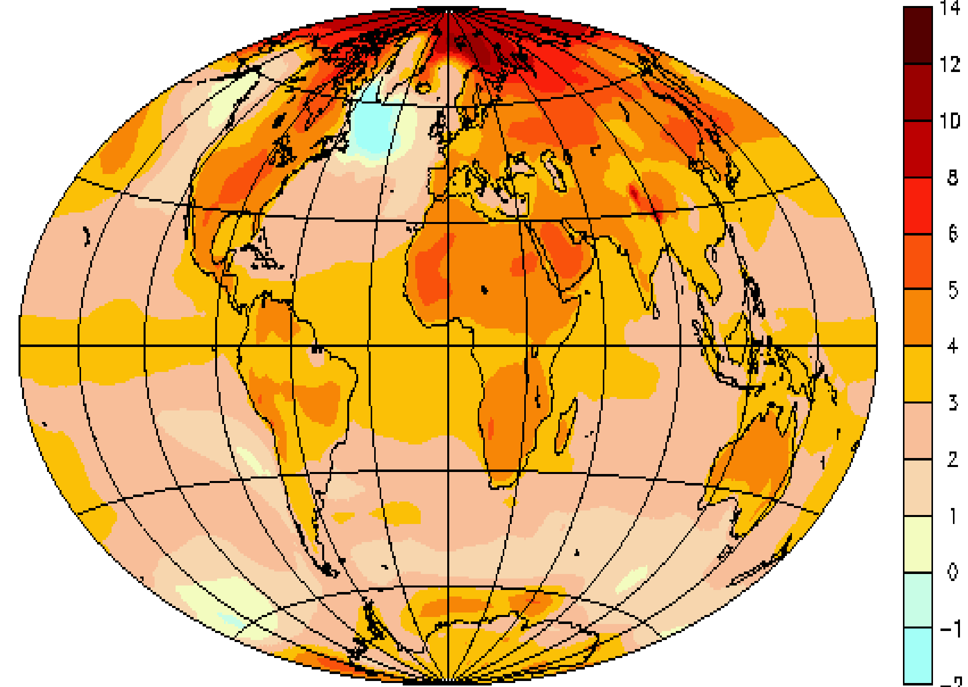
(Dufresne & Bony 2008)

Projection pour l'an 2100

Changement des températures pour le scénario A2



IPCC / IPSL – SRESA2 scenario – Anomalies de la temperature (deg C)
(2090–2099) comparee a (2000–2009)

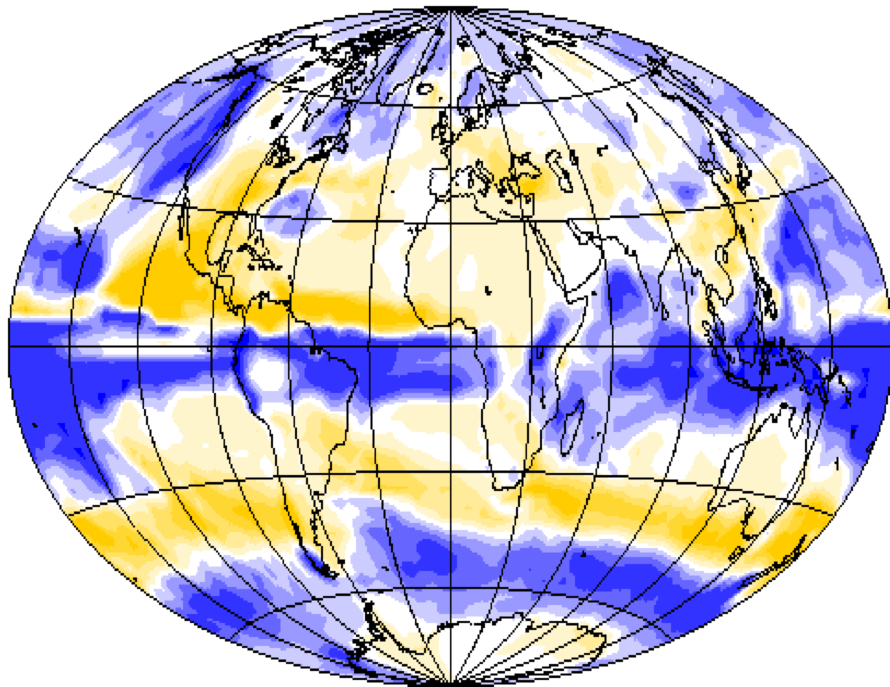


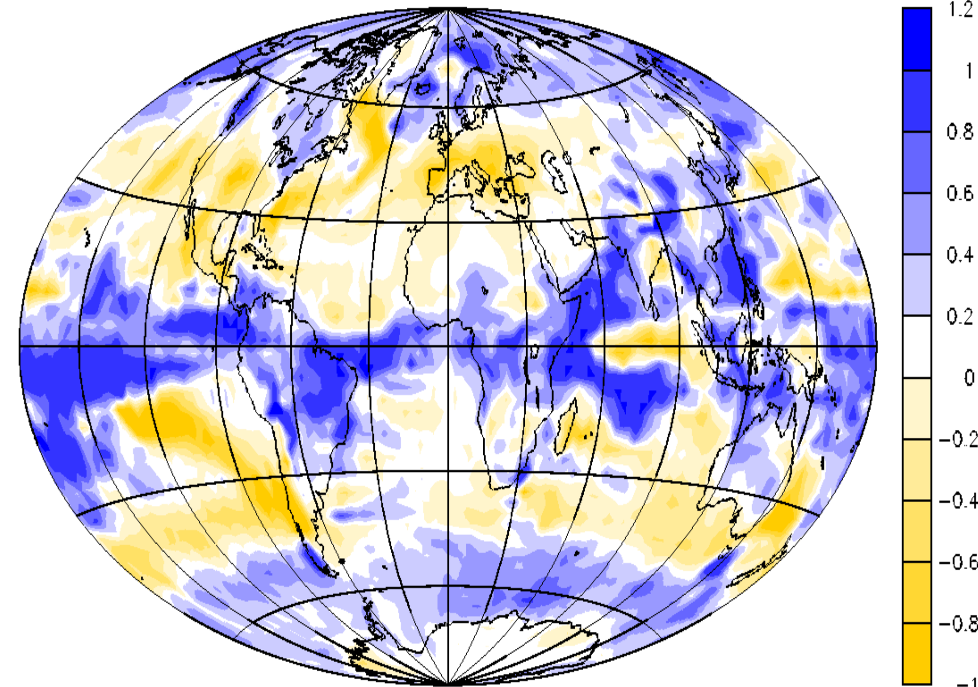
IPCC / CNRM – SRESA2 scenario – Anomalies de la temperature (deg C)
(2090–2099) comparee a (2000–2009)

Source: CNRM et IPSL, 2006

Projection pour l'an 2100

Changement de précipitations pour le scénario A2

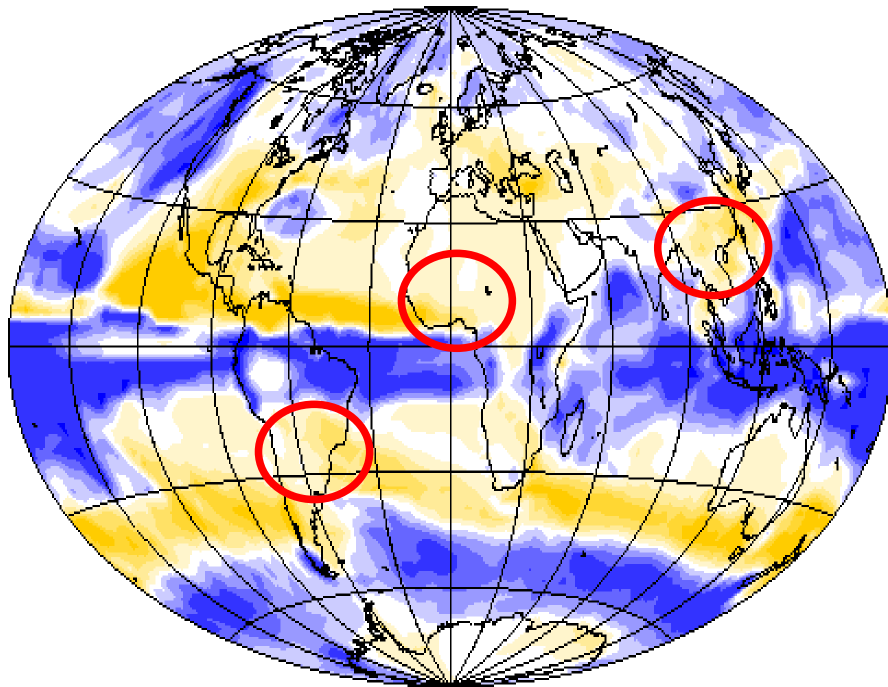


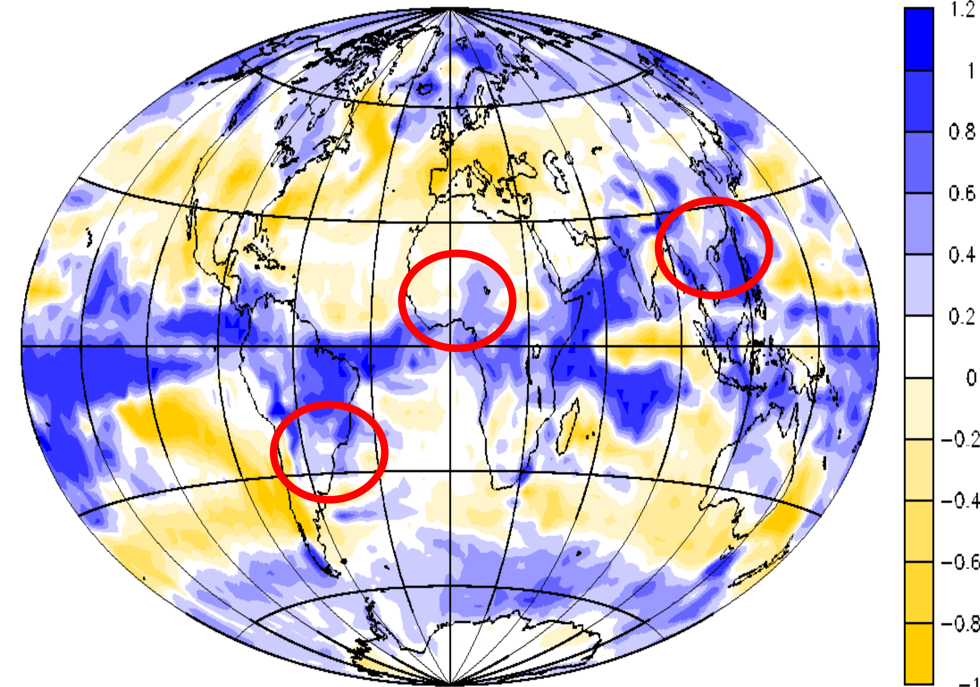


Source: CNRM et IPSL, 2006

Projection pour l'an 2100

Changement de précipitations pour le scénario A2





Source: CNRM et IPSL, 2006

Conclusions

- Le climat va changer de façon importante si les émissions de CO_2 et d'autres gaz à effet de serre ne sont pas réduites
- la distribution géographique du changement de température est assez bien connue
- ceci n'est pas le cas pour les précipitations
- le stress hydrique des plantes va augmenter (accroissement de l'évaporation)
- le cycle saisonnier de l'eau disponible va changer
- le niveau de la mer va augmenter
- Cyclones? Tempêtes? Orages ? Changements abruptes?
- L'océan et la végétation continueront-il à capter la moitié du CO_2 émis par l'homme?

Merci de votre attention